



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE ADESIVOS**  
**NANOMOFICADOS POR NANOTUBOS DE CARBONO**

**Elvis Carneiro Monteiro**

Belo Horizonte

Maio de 2016

**Elvis Carneiro Monteiro**

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE ADESIVOS  
NANOMOFICADOS POR NANOTUBOS DE CARBONO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projeto Mecânico

Orientador: Prof. Antônio Ferreira Ávila, PHD.

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Belo Horizonte

Maio de 2016

M775d Monteiro, Elvis Carneiro.  
Desenvolvimento e análise de adesivos nanomodificados por nanotubos de carbono [manuscrito] / Elvis Carneiro Monteiro. – 2016.  
xiii, 99 f., enc.: il.

Orientador: Antônio Ferreira Ávila.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 82-99.

Bibliografia: f. 77-81.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Materiais compostos - Teses.  
3. Nanotubos de carbono - Teses. 4. Adesivos - Teses. 5. Juntas (Engenharia) - Teses. 6. Polímeros - Teses. I. Ávila, Antônio Ferreira. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621(043)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário  
31270-901 - Belo Horizonte - MG  
Tel.: +55 31 3409.5145  
E-mail: [cpgmec@demec.ufmg.br](mailto:cpgmec@demec.ufmg.br)

**"DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE ADESIVOS  
NANOMODIFICADOS POR NANOTUBOS DE CARBONO"**

**ELVIS CARNEIRO MONTEIRO**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Projeto Mecânico**".

Dissertação aprovada no dia 31 de maio de 2016.

Por:

\_\_\_\_\_  
**Prof. Antônio Ferreira Ávila**  
Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

\_\_\_\_\_  
**Prof. Rogério Pinto Ribeiro**  
Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

\_\_\_\_\_  
**Prof. Danilo Amaral**  
Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

*Ao meus pais, Armando e Elza*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Armando e Elza, pela imensa dedicação, incentivo e apoio dados a mim ao longo da vida.

Ao professor Ávila, pela atenção, paciência, boa vontade e, sobretudo, pela amizade construída ao longo do tempo.

À minhas amigas, Aline e Viviane, pela amizade e pela ajuda durante a realização deste trabalho.

Ao meu amigo Henrique, pela amizade e pela ajuda durante o desenvolvimento experimental.

Ao meu amigo, Almir, pela amizade e contribuições dadas a este trabalho. A todos os amigos do laboratório de Mecânica de Compósitos da UFMG, Suchila, Jéssica, Luciana, Fernanda, Adriene, Camila e Paulo, pelo companheirismo, amizade e pelo suporte dado a este trabalho.

Ao professor Alexsander, por sempre estar disponível a contribuir para minha formação como mestre.

Ao meu amigo Gege, pela amizade e pelas horas inestimáveis de conversas e conselhos.

Ao Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Ensino Superior – CAPES, agradeço o suporte financeiro que garantiu minha dedicação à essa pesquisa.

*“Não vos amoldeis às estruturas deste mundo,  
mas transformai-vos pela renovação da mente,  
a fim de distinguir qual é a vontade de Deus:  
o que é bom, o que Lhe é agradável, o que é perfeito.  
(Bíblia Sagrada, Romanos 12, 2)*

## RESUMO

Este estudo tem por objetivo investigar a influencia da espessura da camada adesiva e da dispersão de nanoestruturas nas propriedades mecânicas das juntas coladas, utilizando adesivo epóxi. Para tal, três concentrações de nanotubos: 0,5%, 1,0% e 2,0% em peso; e três espessuras diferentes: 0,05 mm, 0,15 mm e 0,4 mm foram avaliadas. As propriedades mecânicas foram mensuradas utilizando o ensaio de cisalhamento aparente por tração, tendo como base a norma ASTM D5868. Os resultados mostraram uma significativa alteração nos modos de falha observados nas juntas rompidas. Ao que tudo indica a adição de nanotubos promoveu a criação de uma interface mais resistente, fato evidenciado pelo aumento na intensidade do dano observado nas regiões de falha. A falha migrou de uma forma mista de falha adesiva e LFT para um tipo puramente LFT com alto grau de dano nas fibras dos aderentes, como pode ser observado nos grupos que receberam 1,0% e 2,% de nanotubos de carbono. A redução da espessura influenciou o da capacidade de carga, promovendo um aumento de até 57,12% na resistência final da junta, tal fato já era esperado. No entanto, a adição de nanotubos além de promover um aumento da rigidez do adesivo teve influencia nos modos de falha. As variações nos modos de falha causados pela adição de nanotubos de carbono promoveram um aumento da capacidade de carga de até 11%.

**Palavras-chave:** Juntas coladas, Materiais Compósitos, Nanotubos de Carbono, Espessura do Adesivo, Polímeros.

## ABSTRACT

This study investigates the influence of the adhesive thickness and the dispersions of nanostructures on mechanical properties of bonded joints using epoxy adhesive. To achieve this goal, three nanotube concentrations: 0.5%, 1.0% and 2.0% by weight; and three different thicknesses: 0.05 mm, 0.15 mm and 0.4 mm were evaluated. The mechanical properties were measured using the apparent shear tensile test, based on ASTM D5868. The results showed a significant change in failure mode observed in the broken joints. Apparently the addition of nanotubes promoted the creation of a stronger interface, as evidenced by the increase in the intensity of the damage observed in the failure regions. Failure migrated from a mixed form of adhesive failure and LFT for a purely LFT type with high degree of damage on the adhered fibers, as can be seen in the groups that received 1.0% and 2.0% carbon nanotubes. The reduction in thickness influence the load capacity, causing an increase up to 57.12% in final strength of the joint, this fact was already expected. However, the addition of nanotubes promoted an increase on adhesive stiffness and influenced on failure modes. Variations in failure modes caused by the addition of carbon nanotubes promoted an increase in the load capacity up to 11%.

**Keywords:** Bonded Joints, Composite Materials, Carbon Nanotubes, Adhesive Thickness, Polymers.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Evolução da aplicação de materiais compósitos nas aeronaves da Airbus. . . . .	2
Figura 2 – Montagem da fuselagem do cargueiro X-55A . . . . .	2
Figura 3 – Representação das fases constituintes de um compósito . . . . .	5
Figura 4 – Gráfico Tensão-Deformação: fibra, matriz e compósito . . . . .	6
Figura 5 – Classificação geral dos compósitos . . . . .	7
Figura 6 – Fotomicrografia de carbeto de tungstênio em matriz de cobalto. . . . .	8
Figura 7 – Arquitetura bidimensional . . . . .	9
Figura 8 – Arquitetura tridimensional . . . . .	9
Figura 9 – Comportamento da fibra de aramida sob efeito compressivo . . . . .	10
Figura 10 – Estrutura atômica das fibras de carbono . . . . .	11
Figura 11 – Whisker de Carbeto de Sílica (SiC) . . . . .	12
Figura 12 – Possível arranjo das moléculas de polímero . . . . .	13
Figura 13 – Representação de um polímero termoplástico e termofixo . . . . .	13
Figura 14 – Variação do módulo de elasticidade para três diferentes tipos de polímeros . . . . .	14
Figura 15 – Relações área/volume para várias geometrias do reforço . . . . .	16
Figura 16 – Representação esquemática dos tipos de nanoestruturas. . . . .	16
Figura 17 – Microscopia TEM de um nanocompósito de montmorillonita, mostrando ambas as morfologias intercaladas e esfoliadas . . . . .	17
Figura 18 – Representação esquemática dos tipos de nanopartículas . . . . .	18
Figura 19 – Modelo molecular de uma única camada de grafeno . . . . .	19
Figura 20 – Modelo molecular de uma única SWCNTs . . . . .	21
Figura 21 – Modelo molecular de uma única MWCNTs . . . . .	22
Figura 22 – Configurações de juntas adesivas comumente usadas . . . . .	27
Figura 23 – Modos de falha para juntas de materiais compósitos . . . . .	30
Figura 24 – Tipos de Tensões em juntas single-lap . . . . .	30
Figura 25 – Junta considerada por Volkersen . . . . .	32
Figura 26 – Junta "single-lap" considerada por Goland e Reissner . . . . .	33
Figura 27 – Distribuição de tensões em uma junta "single-lap" de acordo com a análise de Goland e Reissner . . . . .	33
Figura 28 – Junta single-lap com elementos finitos. (a) Modelo completo (b) Ampliação da região de overlap . . . . .	34
Figura 29 – Lavadora ultrassônica digital Kondortech, modelo CD-4820 . . . . .	36
Figura 30 – Estufa Fornos Magnu's . . . . .	37
Figura 31 – Dispositivo guia para colagem de juntas . . . . .	37
Figura 32 – Prensa hidráulica PHI, modelo QR-240C . . . . .	37
Figura 33 – Máquina de ensaios universal EMIC . . . . .	38
Figura 34 – Dimensões do corpo de prova . . . . .	40

Figura 35 – Curva Força x Deslocamento - Grupo A00-005 . . . . .	42
Figura 36 – Regiões de falha - Grupo A00-005 . . . . .	43
Figura 37 – Curva Força x Deslocamento - Grupo A00-015 . . . . .	44
Figura 38 – Regiões de falha - Grupo A00-015 . . . . .	45
Figura 39 – Perfil do filme de adesivo - Grupo A00-040 . . . . .	46
Figura 40 – Curva Força x Deslocamento - Grupo A00-040 . . . . .	47
Figura 41 – Regiões de falha - Grupo A00-040 . . . . .	47
Figura 42 – Tensão máxima na ruptura - A00-xxx . . . . .	48
Figura 43 – Deslocamento máximo na ruptura - A00-xxx . . . . .	48
Figura 44 – Rigidez Intrínseca - A00-xxx . . . . .	49
Figura 45 – Curva Força x Deslocamento - Grupo A05-005 . . . . .	50
Figura 46 – Regiões de falha - Grupo A05-005 . . . . .	51
Figura 47 – Curva Força x Deslocamento - Grupo A05-015 . . . . .	52
Figura 48 – Regiões de falha - Grupo A05-015 . . . . .	53
Figura 49 – Curva Força x Deslocamento - Grupo A05-040 . . . . .	54
Figura 50 – Regiões de falha - Grupo A05-040 . . . . .	55
Figura 51 – Tensão máxima na ruptura - A05-xxx . . . . .	56
Figura 52 – Deslocamento máximo na ruptura - A05-xxx . . . . .	56
Figura 53 – Rigidez Intrínseca - A05-xxx . . . . .	56
Figura 54 – Curva Força x Deslocamento - Grupo A10-005 . . . . .	57
Figura 55 – Regiões de falha - Grupo A10-005 . . . . .	58
Figura 56 – Curva Força x Deslocamento - Grupo A10-015 . . . . .	59
Figura 57 – Regiões de falha - Grupo A10-015 . . . . .	60
Figura 58 – Curva Força x Deslocamento - Grupo A10-040 . . . . .	61
Figura 59 – Regiões de falha - Grupo A10-040 . . . . .	61
Figura 60 – Tensão máxima na ruptura - A10-xxx . . . . .	62
Figura 61 – Deslocamento máximo na ruptura - A10-xxx . . . . .	62
Figura 62 – Rigidez Intrínseca - A10-xxx . . . . .	63
Figura 63 – Curva Força x Deslocamento - Grupo A20-005 . . . . .	64
Figura 64 – Regiões de falha - Grupo A20-005 . . . . .	64
Figura 65 – Curva Força x Deslocamento - Grupo A20-015 . . . . .	65
Figura 66 – Regiões de falha - Grupo A20-015 . . . . .	66
Figura 67 – Curva Força x Deslocamento - Grupo A20-040 . . . . .	67
Figura 68 – Regiões de falha - Grupo A20-040 . . . . .	68
Figura 69 – Tensão máxima na ruptura - A20-xxx . . . . .	69
Figura 70 – Deslocamento máximo na ruptura - A20-xxx . . . . .	69
Figura 71 – Rigidez Intrínseca - A20-xxx . . . . .	70
Figura 72 – Tensão máxima na ruptura - Espessura 0,05 mm . . . . .	70
Figura 73 – Deslocamento máximo na ruptura - Espessura 0,05 mm . . . . .	71

Figura 74 – Tensão máxima na ruptura - Espessura 0,15 mm . . . . .	71
Figura 75 – Deslocamento máximo na ruptura - Espessura 0,15 mm . . . . .	72
Figura 76 – Tensão máxima na ruptura - Espessura 0,40 mm . . . . .	73
Figura 77 – Deslocamento máximo na ruptura - Espessura 0,40 mm . . . . .	73
Figura 78 – Análise ANOVA - Deslocamento Máximo para Grupo A00-xxx . . . . .	82
Figura 79 – Análise ANOVA - Tensão Máxima para Grupo A00-xxx . . . . .	83
Figura 80 – Análise ANOVA - Rigidez para Grupo A00-xxx . . . . .	84
Figura 81 – Análise ANOVA - Deslocamento Máximo para Grupo A05-xxx . . . . .	85
Figura 82 – Análise ANOVA - Tensão Máxima para Grupo A05-xxx . . . . .	86
Figura 83 – Análise ANOVA - Rigidez para Grupo A05-xxx . . . . .	87
Figura 84 – Análise ANOVA - Deslocamento Máximo para Grupo A10-xxx . . . . .	88
Figura 85 – Análise ANOVA - Tensão Máxima para Grupo A10-xxx . . . . .	89
Figura 86 – Análise ANOVA - Rigidez para Grupo A10-xxx . . . . .	90
Figura 87 – Análise ANOVA - Deslocamento Máximo para Grupo A20-xxx . . . . .	91
Figura 88 – Análise ANOVA - Tensão Máxima para Grupo A20-xxx . . . . .	92
Figura 89 – Análise ANOVA - Rigidez para Grupo A20-xxx . . . . .	93
Figura 90 – Análise ANOVA - Deslocamento Máximo para os grupos com espessura de 0,05 mm . . . . .	94
Figura 91 – Análise ANOVA - Tensão Máxima para os grupos com espessura de 0,05 mm	95
Figura 92 – Análise ANOVA - Deslocamento Máximo para os grupos com espessura de 0,15 mm . . . . .	96
Figura 93 – Análise ANOVA - Tensão Máxima para os grupos com espessura de 0,15 mm	97
Figura 94 – Análise ANOVA - Deslocamento Máximo para os grupos com espessura de 0,40 mm . . . . .	98
Figura 95 – Análise ANOVA - Tensão Máxima para os grupos com espessura de 0,40 mm	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição aproximada de algumas fibras de vidro (wt%) . . . . .	10
Tabela 2 – Propriedades mecânicas de nanotubos . . . . .	22
Tabela 3 – Propriedades of CNT/poliamida nanocompositos . . . . .	23
Tabela 4 – Conjuntos de Teste . . . . .	39
Tabela 5 – Espessura média dos CP's do grupo A00-005 . . . . .	41
Tabela 6 – Resultados dos ensaios de tração - AR00-005 . . . . .	42
Tabela 7 – Espessura da camada adesiva- AR00-015 . . . . .	43
Tabela 8 – Resultados dos ensaios de tração - AR00-015 . . . . .	44
Tabela 9 – Espessura da camada adesiva- AR00-040 . . . . .	46
Tabela 10 – Resultados dos ensaios de tração - AR00-040 . . . . .	46
Tabela 11 – Espessura da camada adesiva - AR05-005 . . . . .	49
Tabela 12 – Resultados dos ensaios de tração - AR05-005 . . . . .	49
Tabela 13 – Espessura da camada adesiva - AR05-015 . . . . .	51
Tabela 14 – Resultados dos ensaios de tração - AR05-015 . . . . .	52
Tabela 15 – Espessura média da camada adesiva - AR05-040 . . . . .	53
Tabela 16 – Resultados dos ensaios de tração - AR05-015 . . . . .	54
Tabela 17 – Espessura média da camada adesiva - A10-005 . . . . .	57
Tabela 18 – Resultados dos ensaios de tração - A10-005 . . . . .	58
Tabela 19 – Espessura média da camada adesiva - A10-015 . . . . .	58
Tabela 20 – Resultados dos ensaios de tração - A10-015 . . . . .	59
Tabela 21 – Espessura média da camada adesiva - A10-040 . . . . .	60
Tabela 22 – Espessura média da camada adesiva - A20-005 . . . . .	63
Tabela 23 – Resultados dos ensaios de tração - A20-005 . . . . .	64
Tabela 24 – Espessura média da camada adesiva - A20-015 . . . . .	65
Tabela 25 – Resultados dos ensaios de tração - A20-015 . . . . .	65
Tabela 26 – Espessura média da camada adesiva - A20-040 . . . . .	66
Tabela 27 – Resultados dos ensaios de tração - A20-040 . . . . .	67

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	Análise Estatística de Variância
CNT	" <i>Carbon Nanotubes</i> "
LFT	" <i>Light-Fiber Tear</i> "
MWCNT	" <i>Multi-wall Carbon Nanotubes</i> "
SEM	" <i>Scanning Electron Microscopy</i> "
SWCNT	" <i>Single-wall Carbon Nanotubes</i> "
TEM	" <i>Transmission Electron Microscopy</i> "

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> . . . . .	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivos Gerais</b> . . . . .	<b>4</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> . . . . .	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> . . . . .	<b>5</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais Compósitos</b> . . . . .	<b>5</b>
3.1.1	<u>Definição</u> . . . . .	5
3.1.2	<u>Classificação dos Compósitos quanto ao reforço</u> . . . . .	7
3.1.2.1	Compósitos Particulados . . . . .	7
3.1.2.2	Compósitos de Fibras Contínuas . . . . .	8
3.1.2.3	Compósitos de Fibras descontínuas ou whiskers . . . . .	11
3.1.3	<u>Classificação dos Compósitos quanto à matriz</u> . . . . .	11
3.1.3.1	Matrizes poliméricas . . . . .	12
3.1.3.2	Matrizes Metálicas . . . . .	14
3.1.3.3	Matrizes Cerâmicas . . . . .	14
<b>3.2</b>	<b>Nanocompósitos</b> . . . . .	<b>15</b>
3.2.1	<u>Nanocompósitos poliméricos</u> . . . . .	15
3.2.2	<u>Nanopartículas</u> . . . . .	17
3.2.2.1	Grafeno . . . . .	18
3.2.2.2	Nanotubos de Carbono . . . . .	21
<b>3.3</b>	<b>Uniões Adesivas</b> . . . . .	<b>24</b>
3.3.1	<u>Vantagens e Desvantagens</u> . . . . .	25
3.3.2	<u>Projeto de Juntas Adesivas</u> . . . . .	26
3.3.3	<u>Configurações de Juntas</u> . . . . .	27
3.3.4	<u>Características dos Adesivos</u> . . . . .	27
3.3.5	<u>Mecanismos de Falha</u> . . . . .	28
3.3.6	<u>Análise de Tensões</u> . . . . .	30
3.3.7	<u>Influencia da espessura da camada adesiva</u> . . . . .	34
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> . . . . .	<b>36</b>
<b>4.1</b>	<b>Materiais e equipamentos</b> . . . . .	<b>36</b>
<b>4.2</b>	<b>Procedimentos</b> . . . . .	<b>38</b>
4.2.1	<u>Aderentes e Tabs</u> . . . . .	38
4.2.2	<u>Dispersão das nanoestruturas e colagem das juntas</u> . . . . .	39
4.2.3	<u>Testes Mecânicos</u> . . . . .	40

<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>41</b>
<b>5.1</b>	<b>Influencia da espessura da camada adesiva</b>	<b>41</b>
5.1.1	<u>AR300 sem adição de nanotubos de carbono</u>	41
5.1.1.1	Espessura fina - 0,05 mm (A00-005)	41
5.1.1.2	Espessura média 0,15 mm (A00-015)	43
5.1.1.3	Espessura maior 0,40 mm (A00-040)	45
5.1.1.4	Visão geral do grupo	48
5.1.2	<u>AR300 + 0,5% MWCNT</u>	49
5.1.2.1	Espessura fina - 0,05 mm (A05-005)	49
5.1.2.2	Espessura média - 0,15 mm (A05-015)	51
5.1.2.3	Espessura maior - 0,40 mm (A05-040)	53
5.1.2.4	Visão geral do grupo	55
5.1.3	<u>AR300 + 1,0% MWCNT</u>	57
5.1.3.1	Espessura fina - 0,05 mm (A10-005)	57
5.1.3.2	Espessura média - 0,15 mm (A10-015)	58
5.1.3.3	Espessura maior - 0,40 mm (A10-040)	60
5.1.3.4	Visão geral do grupo	62
5.1.4	<u>AR300 + 2,0% MWCNT</u>	63
5.1.4.1	Espessura fina - 0,05 mm (A20-005)	63
5.1.4.2	Espessura média - 0,15 mm (A20-015)	65
5.1.4.3	Espessura maior - 0,4 mm (A20-040)	66
5.1.4.4	Visão geral do grupo	68
<b>5.2</b>	<b>Influencia da dispersão de MWCNT</b>	<b>70</b>
5.2.1	<u>Espessura de 0,05 mm</u>	70
5.2.2	<u>Espessura de 0,15 mm</u>	71
5.2.3	<u>Espessura de 0,40 mm</u>	72
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>74</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>77</b>
	<b>APÊNDICE A – ANÁLISE ANOVA</b>	<b>82</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Na maioria das aplicações práticas, estruturas são complexas demais para serem produzidas em peça única, seja devido ao alto custo de produção ou pelas limitações geométricas do projeto. A solução para esta limitação é a fragmentação da estrutura final em uma série de subcomponentes factíveis de serem produzidos e que possam ser posteriormente unidos. Este processo de união cria junções que podem ser manufaturadas em variadas formas, por exemplo, pelo uso de parafuso e rebites, soldagem, brasagem, união adesiva, entre outras. Do ponto de vista estrutural, estas junções são responsáveis por transmitir os esforços entre os componentes permitindo que a estrutura final alcance rigidez (TONG; STEVEN, 1999). Tong e Steven (TONG; STEVEN, 1999) atentam para que independente de quais sejam as formas de conexão utilizadas, juntas são potenciais pontos fracos na estrutura. As estatísticas apontam que aproximadamente 70% das falhas em estruturas são iniciadas em juntas (HER, 1999).

Nos últimos anos a aplicação de materiais compósitos vem crescendo em setores da indústria: construção, aeroespacial (FIG.1), naval e automotiva. Seus principais atrativos são a sua baixa densidade, alta resistência mecânica e à corrosão e o reduzido custo de manufatura e manutenção (GOUDA et al., 2013). Muito embora o uso destes compósitos possa reduzir o número de parte da estrutura, a união de subcomponentes ainda é inevitável. Um bom exemplo da redução drástica que os compósitos podem promover no número de junções é o cargueiro X-55A, produzido pela Lockheed Martin. A fuselagem em peça única (FIG. 2) com 18 m de comprimento feita com compósitos de carbono/epoxy, reduziu em 10 vezes a quantidade de partes e em mais de 100 vezes a quantidade de fixadores.

Os métodos tradicionais de fixação (parafusos e rebites) podem na maioria das vezes não ser adequados para compósitos reforçados por fibras. Isto se deve ao fato dos furos para passagem destes fixadores cortarem as fibras de reforço e, como resultado, promoverem uma redução da capacidade global cargas(BUENO, 2002) da estrutura. Segundo Wahab (WAHAB et al., 2003), juntas adesivas são uma interessante alternativa para compósitos devido às suas muitas vantagens se comparadas às juntas tradicionais, por exemplo, redução de peso e custo, aumento do desempenho estrutural e resistência à fadiga.

Adesivos têm sido utilizados desde os primórdios da humanidade. No início do século XX os adesivos à base de polímeros sintéticos foram introduzidos, mas sua utilização foi limitada devido ao seu elevado custo e propriedades mecânicas pobres (CRUZ et al., 2013). Foi apenas a partir da década de 1940 que maiores esforços científicos foram empregados na compreensão do fenômeno da adesão (CROCCOMBIE; ASHCROFT, 2008). A indústria aeronáutica foi a primeira na aplicação de adesivos estruturais, tendo seu início já na Primeira Guerra Mundial. No início dos anos 40, o avião De Havilland Mosquito, com sua estrutura em madeira, é citado

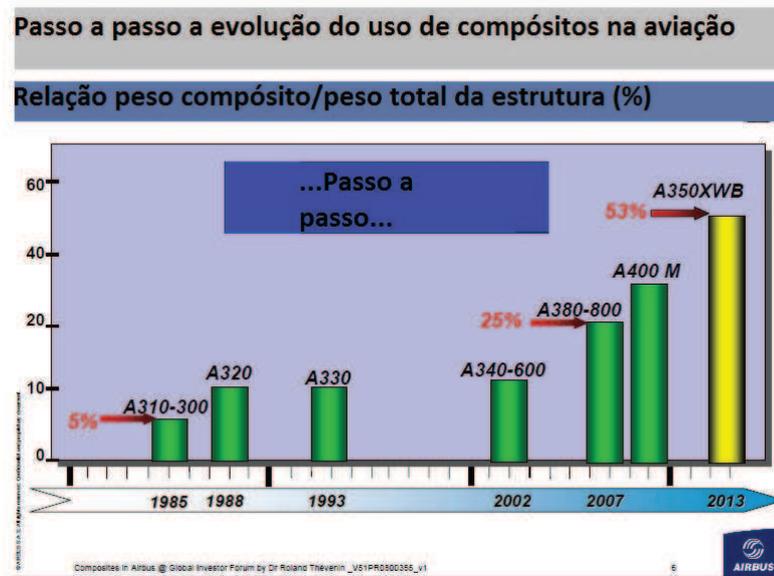


Figura 1: Evolução da aplicação de materiais compósitos nas aeronaves da Airbus.

Fonte: Adaptado de AIRBUS (2015)



Figura 2: Montagem da fuselagem do cargueiro X-55A

Fonte: Adaptado de LOCKHEED (2014)

como o primeiro modelo a ser produzido em grande escala com colagem adesiva. Em 1948 o avião SAAB J29 possuía 10 partes de metal coladas e, em 1967, outro SAAB, AJ377 já possuía 330 partes coladas. Já no início dos anos de 1980, no SAAB 340, as partes coladas incluíam o revestimento integral da seção constante, partes da curva do nariz e do cone da cauda, reforçadores do revestimento interno do caixão da asa principal e o revestimento sanduíche dos

estabilizadores vertical e horizontal (BUENO, 2002).

A aplicação de adesivos na indústria naval possui também uma longa história, onde se inclui a colagem de reforçadores, fabricação de painéis sanduíche e fixações (BUENO, 2002). Na indústria automobilística, a colagem de lonas de freio e embreagens, além de inovações como o eixo cardan em fibra de carbono unido por adesivo às fixações da saída da caixa de marchas e diferencial, podem ser citadas (TONG; STEVEN, 1999).

Essa crescente demanda no emprego de juntas adesivas em diversos segmentos industriais levou à necessidade do desenvolvimento de novas técnicas, adequadas às inúmeras possibilidades de uso. A descoberta das nanoestruturas, das quais se destacam as de base carbônica, ampliou as possibilidades para o desenvolvimento de novos materiais, sobretudo para compósitos em matriz polimérica. Inúmeros estudos vêm sendo conduzidos nos últimos anos a fim de analisar a influência da dispersão destas nanoestruturas nas propriedades mecânicas, químicas e elétricas de vários tipos de matrizes poliméricas.

O capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica sobre temas importantes para o desenvolvimento deste trabalho, onde são abordados os conceitos e definições básicas sobre materiais compósitos, juntas coladas, nanociência e nanocompósitos. O capítulo 4 descreve detalhadamente toda metodologia empregada na preparação das amostras e realização dos testes. O capítulo 5 apresenta e discute os resultados obtidos. O capítulo 6 contém as conclusões finais e sugestões para novos trabalhos.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos Gerais**

Desenvolvimento e análise de adesivos nano-modificados a partir da adição de nanotubos de carbono em resina epóxi. As nanoestruturas de base carbono serão dispersas em diferentes concentrações com o auxílio da técnica de homogeneização por ultrassom. A hipótese a ser testada é a de que as nanoestruturas promovem um melhoramento nas propriedades mecânicas da resina. A influencia da espessura da camada adesiva também será avaliada, para tal 3 espessuras diferentes serão empregadas: muito fina (0,05 mm), média (0,15 mm) e espessa (0,40 mm)

### **2.2 Objetivos Específicos**

1. Dispersar os nanotubos de carbono no sistema epóxi utilizado como adesivo
2. Analisar a influência das diferentes concentrações de nanotubos de carbono sobre as propriedades mecânicas.
3. Produzir juntas single-lap com diferentes espessuras de camada adesiva.
4. Avaliar a influência da espessura da camada adesiva sobre as propriedades finais das juntas
5. Caracterizar as propriedades mecânicas das juntas de acordo com norma ASTM 5868-01.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Materiais Compósitos

#### 3.1.1 Definição

Para Smith (1998), compósito é qualquer material formado de constituintes diferentes. Porém esta definição é muito abrangente, pois dependendo da escala métrica em que é feita a análise, algumas ligas metálicas e alguns materiais poliméricos podem ser considerados compósitos, uma vez que são formados por grupamentos atômicos diferentes. Para fins deste trabalho será adotada a definição proposta por Daniel e Ishai (1994) e também por Jones (1999), na qual compósito se refere a um sistema de duas ou mais fases combinadas em uma escala macroscópica, que se bem projetado, apresenta características muito superiores aos seus constituintes isolados. Uma dessas fases apresenta-se de forma descontínua, sendo mais rígida e resistente, recebendo o nome de reforço. Enquanto a fase menos rígida e contínua recebe o nome de matriz. Em alguns casos dependendo da interação química entre as fases, pode haver o surgimento de uma terceira fase chamada interface, que se apresenta como uma fina camada envolvendo o reforço (FIG.3).

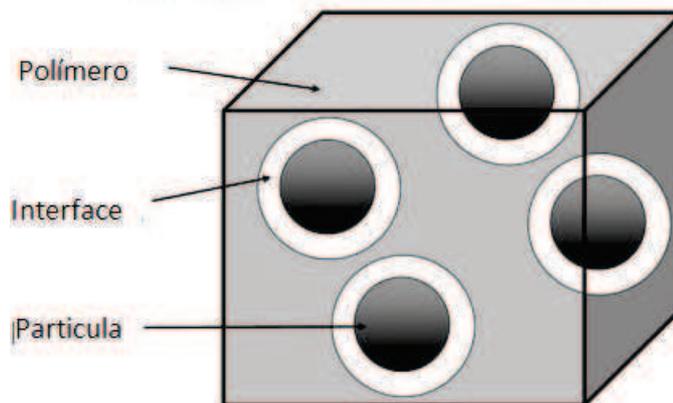


Figura 3: Representação das fases constituintes de um compósito

Fonte: Adaptado de Odegard et al. (2004)

As propriedades finais de um compósito são definidas pelas características individuais de cada um dos seus constituintes, fração volumétrica de ambos na composição final do material, processo empregado na sua manufatura e da distribuição interna do reforço na matriz. Segundo Daniel e Ishai (1994), os compósitos apresentam vantagens sobre os materiais monolíticos (com uma única fase) tais como maior resistência mecânica, alta rigidez, baixa densidade, longa vida em fadiga e adaptabilidade para funções pré-determinadas. Porém, dependendo do tipo de reforço utilizado e da sua distribuição interna, o compósito pode apresentar comportamento ortotrópico ou mesmo anisotrópico. Requerendo do projetista uma análise estrutural mais complexa e detalhada, além

de aumentar consideravelmente o número de testes necessários para a determinação das suas propriedades. Um dos testes mais usuais para caracterização dos materiais é o ensaio de tração.

A curva tensão-deformação apresentada na FIG. 4 exemplifica como o comportamento dos constituintes influenciam as propriedades do compósito. No estágio I tanto matriz e fibra deformam-se em regime elástico. Ao entrar no estágio II, as fibras continuam em regime elástico, enquanto a matriz passa a sofrer deformação plástica. Neste estágio o compósito apresenta uma redução na inclinação da sua curva tensão-deformação, o comportamento continua linear e as fibras passam a suportar uma parcela maior do carregamento. Esta condição prevalece até a falha do material, que ocorre quando as fibras começam a se romper. O compósito, de uma forma geral, se comporta de maneira intermediária entre o comportamento da fibra e da matriz.

Segundo Daniel e Ishai (1994), os materiais compósitos podem ser classificados de acordo com o reforço utilizado: partícula, fibras longas e curtas, veja a FIG. 5. Ou de acordo com a matriz: polimérica, cerâmica ou metálica.

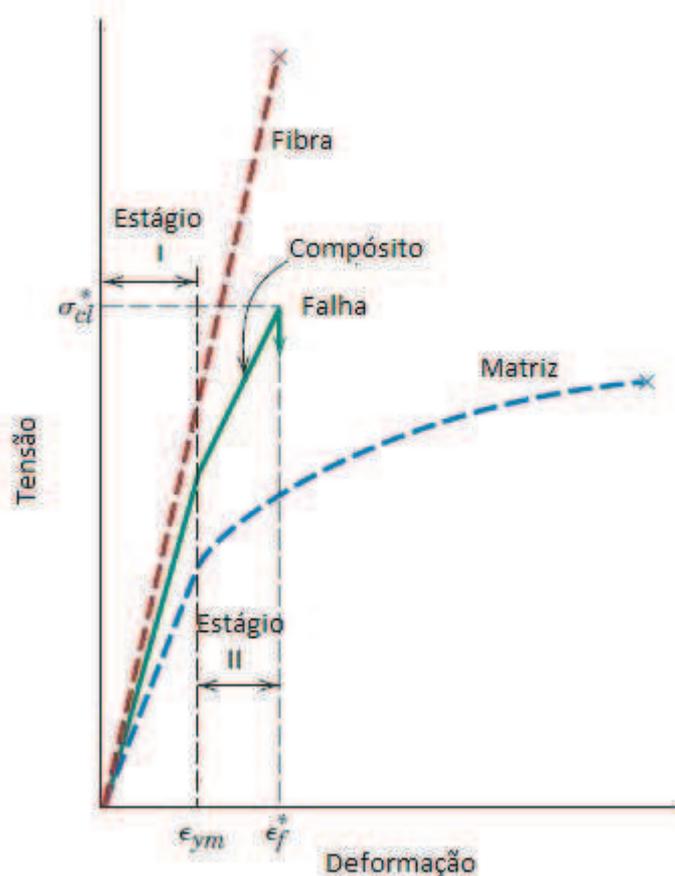


Figura 4: Gráfico Tensão-Deformação: fibra, matriz e compósito

Fonte: Adaptado de Callister (2007)

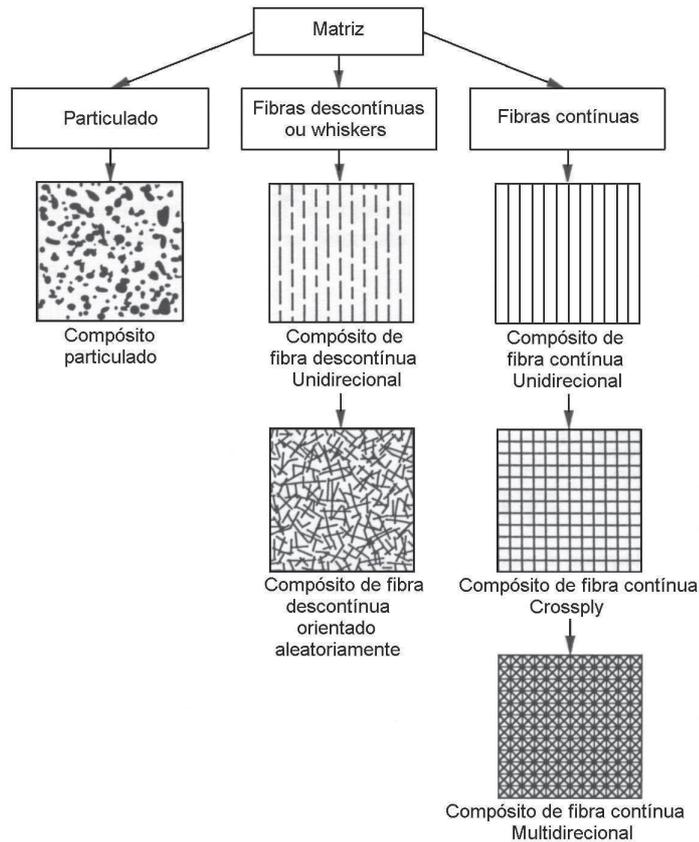


Figura 5: Classificação geral dos compósitos

Fonte: Adaptado de Daniel e Ishai (1994)

### 3.1.2 Classificação dos Compósitos quanto ao reforço

#### 3.1.2.1 Compósitos Particulados

São materiais quase homogêneos e quase isotrópicos. Sua fase dispersa (reforço) possui dimensões aproximadamente iguais em todas as direções. Para estes compósitos a fase dispersa é geralmente mais rígida e dura que a matriz, restringindo assim suas deformações e fazendo com que o esforço seja transferido da matriz para o reforço, que acaba por suportar quase a totalidade da carga. Segundo Callister (2007), a eficiência deste processo de transferência de carregamento depende de quão forte são as ligações na interface matriz-reforço.

Compósitos particulados apresentam como principais vantagens: resistência mecânica, condutividade ou isolamento térmico, redução de custo, melhoria na usinabilidade, aumento da temperatura de operação e da resistência à oxidação. Exemplos típicos desses compósitos incluem adição de carbetos de tungstênio em matriz de cobalto para produção de ferramentas de corte, partículas de alumínio em borracha, carbetos de silício em alumínio, cascalho em areia e cimento para produção de concreto (DANIEL; ISHAI, 1994), entre outros. A fotomicrografia da FIG. 6

mostra um composto de carbeto de tungstênio em matriz de cobalto. As áreas claras são a matriz de cobalto e as áreas escuras são o carbeto de tungstênio. Ampliação de 100x.

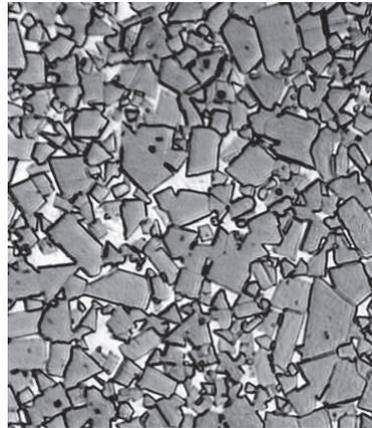


Figura 6: Fotomicrografia de carbeto de tungstênio em matriz de cobalto.

Fonte: Adaptado de Callister (2007)

### 3.1.2.2 Compósitos de Fibras Contínuas

Este tipo de compósito consiste de fibras de alta resistência mecânica distribuídas em uma matriz responsável por conferir estabilidade ao material, proteger e transmitir as tensões entre as fibras. Um dos grandes atrativos ao uso de fibras, é que estas apresentam propriedades muito superiores do que seu material em volume. Segundo Jones (1999), esse fato ocorre devido às fibras possuírem uma estrutura cristalina quase perfeita, onde os cristais se encontram alinhados ao eixo da fibra. As fibras estão disponíveis em uma série de arquiteturas diferentes. Defini-se arquitetura como o arranjo das fibras no interior do compósito. Para fibras longas elas estão disponíveis na forma de unidirecional, bidirecional ou multidirecional (FIG.5).

Na arquitetura unidirecional as fibras se encontram alinhadas em uma única direção. Este tipo de orientação produz compósitos altamente resistentes na direção da fibra, porém de baixa resistência no sentido transversal (DANIEL; ISHAI, 1994). Na arquitetura bidirecional ou multidirecional as fibras estão dispostas no plano em duas ou mais direções de acordo com ângulos ou tramas específicas (FIG. 7). Este tipo de disposição produz compósitos com elevada resistência nas direções do plano, porém de baixa resistência através da espessura, tornando-os suscetíveis à falhas por delaminação (MALLICK, 2007). As arquiteturas unidirecional, bidirecional e multidirecional, também são chamadas unidimensional e bidimensional, respectivamente. Porém, existe um terceiro tipo de arquitetura, a tridimensional (FIG. 8), não tão comum, com fibras dispostas em um arranjo espacial, conferindo alta capacidade de carga em todos os eixos coordenados(MALLICK, 2007).

Segundo Smith (1998), os três principais tipos de fibras sintéticas usadas para reforçar materiais

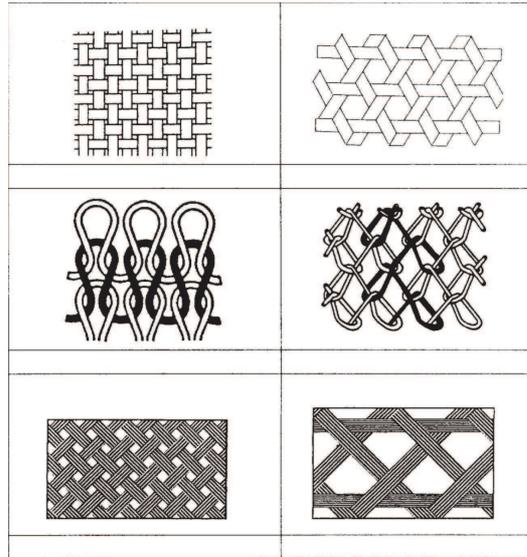


Figura 7: Arquitetura bidimensional

Fonte: Adaptado de Mallick (2007)

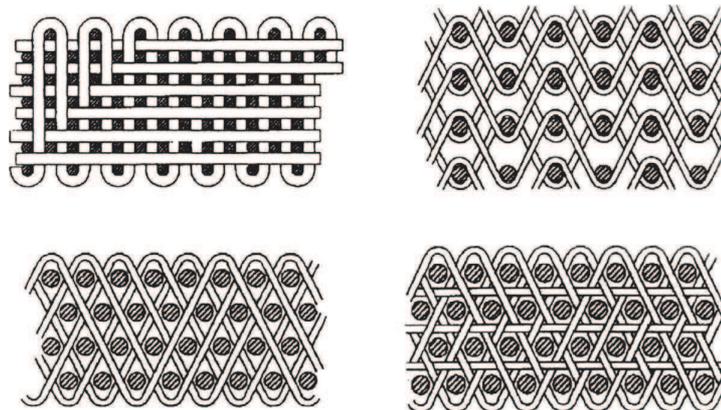


Figura 8: Arquitetura tridimensional

Fonte: Adaptado de Mallick (2007)

poliméricos são: as de vidro, as de aramida e as de carbono. Fibra de vidro é um nome genérico que se dá a um grupo de compostos constituídos majoritariamente de sílica (50%-60%  $SiO_2$ ), mas que possuem variadas concentrações de outros óxidos, dentre eles cálcio, boro, sódio, alumínio e ferro (veja a TAB. 1) (CHAWLA, 2013). Existem dois tipos de fibra de vidro comumente usados para reforçar polímeros, são eles o E-glass e o S-glass. Um outro tipo conhecido como C-glass é utilizado em aplicações químicas que requerem grande resistência à corrosão. A fibra E-glass possui o menor custo comercial de todas as fibras utilizadas como reforço, boa resistência mecânica, razoável módulo de elasticidade e boa isolamento elétrica. Motivos que a tornaram popular entre as indústrias de materiais compósitos. Por sua vez a S-glass foi desenvolvida originalmente para componentes da indústria aeronáutica e armamentista, possui alto custo e uma das melhores resistências a tração de todas as fibras disponíveis no mercado (MALLICK,

2007).

Tabela 1: Composição aproximada de algumas fibras de vidro (wt%)

Composition	E glass	C glass	S glass
$SiO_2$	55.2	65.0	65
$Al_2O_3$	8.0	4.0	25.0
$CaO$	18.7	14.0	-
$MgO$	4.6	3.0	10.0
$Na_2O$	0.3	8.5	0.3
$K_2O$	0.2	-	-
$B_2O_3$	7.3	5.0	-

Fonte: Adaptado de Chawla (2013)

Aramida são fibras de origem polimérica que possuem baixa densidade e a maior relação tensão de ruptura/peso entre as fibras disponíveis atualmente. São utilizadas em várias aplicações marítimas e aeroespaciais, onde são necessárias estruturas leves, alta resistência à tração e ao impacto. Também são extensamente empregadas na fabricação de proteção balística contra armamento de pequeno porte. Segundo Mallick (2007), possuem coeficiente de expansão térmico negativo na direção longitudinal, sendo portanto empregadas em painéis compósitos de baixa expansão térmica. Suas maiores desvantagens são a baixa resistência à compressão (a FIG. 9 mostra uma fibra de aramida apresentando marcas de flambagem no lado sob a ação de forças compressivas) e a dificuldade de usinagem e corte. Como outros polímeros, a aramida é sensível à luz ultravioleta e quando exposta a este tipo de radiação descolore do amarelo para o marrom e perde propriedades mecânicas (CHAWLA, 2013).

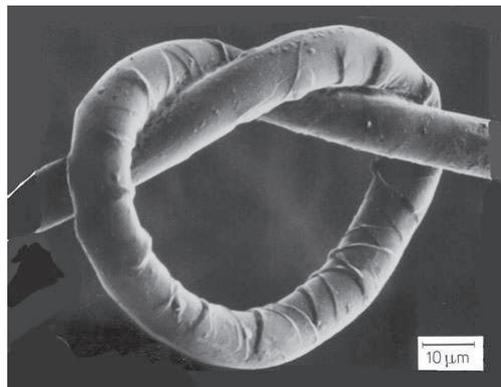


Figura 9: Comportamento da fibra de aramida sob efeito compressivo

Fonte: Adaptado de Chawla (2013)

Fibras de carbono são encontradas comercialmente em uma enorme variedade de propriedades mecânicas, podendo ter módulos de elasticidade de 207 GPa até 1035 GPa, dependendo do tipo da fibra. De forma geral, as fibras com baixo módulo de elasticidade possuem baixa densidade e baixo custo, se comparadas com as fibras de alto módulo. Do ponto de vista de sua estrutura interna, fibras de carbono são um composto de carbono amorfo e carbono grafito, onde seu

alto módulo de elasticidade se deve aos átomos de carbono estarem disposto em uma estrutura hexagonal distribuídas em planos paralelos (FIG. 10) (MALLICK, 2007). No plano os átomos são unidos por fortes ligações covalente, enquanto as ligações entre plano são majoritariamente do tipo van der Waals.

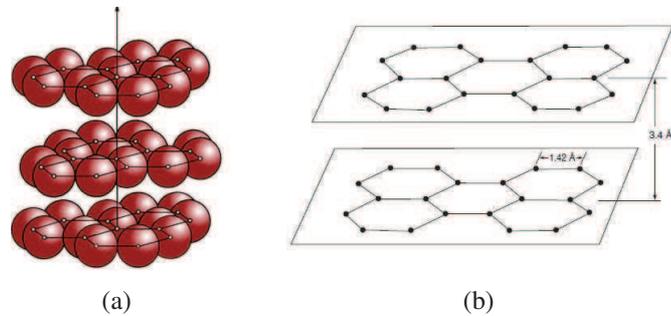


Figura 10: Estrutura atômica das fibras de carbono

Fonte: Adaptado de Chawla (2013)

Entre suas principais vantagens estão: alta resistência mecânica, alto módulo de elasticidade, baixo peso específico, baixíssimo coeficiente de expansão térmica, alta resistência à fadiga e alta condutividade térmica. Entre as desvantagens estão: pequena deformação mecânica até a falha, baixa resistência à impacto, alta condutividade elétrica e alto custo. Suas principais aplicações estão voltadas para a indústria aeronáutica, onde a redução de peso estrutural é mais crítica que o custo final de produção (MALLICK, 2007).

### 3.1.2.3 Compósitos de Fibras descontínuas ou whiskers

Segundo Chawla (2013), whiskers são fibras curtas e monocristalinas que possuem resistência mecânica extremamente alta. Sua resistência elevada, muito próxima da teórica, advém da ausência de imperfeições cristalinas e contornos de grãos. Whiskers geralmente possuem diâmetro de alguns micrômetros e comprimento de alguns milímetros, tendo relação de aspecto (comprimento/diâmetro) variando de 50 a 10000, veja a FIG. 11. Infelizmente, não possuem uniformidade tanto nas suas dimensões, quanto nas propriedades, fazendo desta sua maior desvantagem. Quando dispersos em matriz podem gerar compósitos quase isotrópicos, caso estejam orientadas aleatoriamente, ou compósitos anisotrópicos, caso estejam alinhadas.

### 3.1.3 Classificação dos Compósitos quanto à matriz

Segundo Mallick (2007), os propósitos da matriz são:

1. Dar suporte às fibras, mantendo-as em seu lugar e impedir possível flambagem das mesmas sob a ação de forças compressivas.

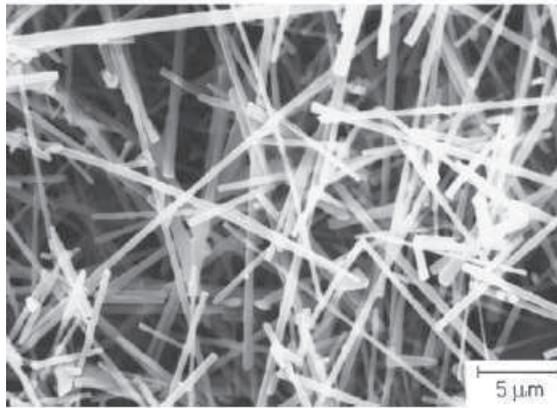


Figura 11: Whisker de Carbetto de Sílica (SiC)

Fonte: Adaptado de Chawla (2013)

2. Transferir os esforços entre as fibras,
3. Prover uma barreira contra agentes externos, protegendo as fibras.

Vários materiais como polímeros, cerâmicas e metais podem ser utilizados como matriz de um compósito (DANIEL; ISHAI, 1994). Os compósitos mais avançados e mais estudados na atualidade são os compósitos de base polimérica, devido ao baixo custo, alta resistência mecânica e facilidade de manufatura. De acordo com Strong (2008), cerca de 90% dos compósitos fabricados na indústria até 2008 possuíam polímeros como matriz.

#### 3.1.3.1 Matrizes poliméricas

O polímero (poli=muito e mero=unidade ou molécula) se apresenta como longas cadeias de moléculas contendo uma ou mais unidades (conjuntos de átomos) de repetição, unidas entre si por fortes ligações covalentes. Um material polimérico pode ser então definido, como uma coleção de grande número de moléculas de polímeros com estrutura química similar, mas não necessariamente o mesmo tamanho (MALLICK, 2007). No estado sólido estas moléculas estão organizadas no espaço sob a forma de polímero amorfo (FIG.12(a)) ou semicristalino (FIG.12(b)).

Segundo Jones (1999), polímeros estão divididos em duas principais categorias: termoplásticos e termofixos. Nos termoplásticos as moléculas individuais são unidas através de fracas ligações de van der Waals e de hidrogênio (FIG. 13(a)). Sob ação de calor, estas ligações secundárias se rompem fazendo que o polímero se funda, permitindo que termoplásticos sejam moldados quantas vezes desejados. Já os termofixos, apresentam moléculas unidas através de ligações covalentes cruzadas, formando uma rígida rede tridimensional (FIG. 13(b)). Uma vez formadas

as ligações cruzadas, o polímero termofixo não se funde sob aplicação de calor, porém pode tornar-se menos rígido a elevadas temperaturas (MALLICK, 2007).

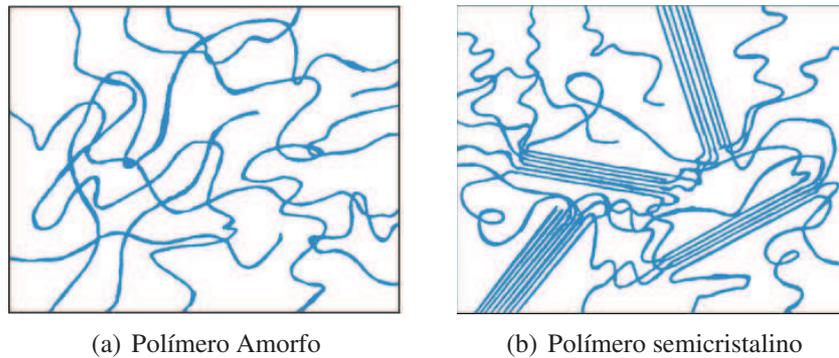


Figura 12: Possível arranjo das moléculas de polímero

Fonte: Adaptado de Chawla (2013)

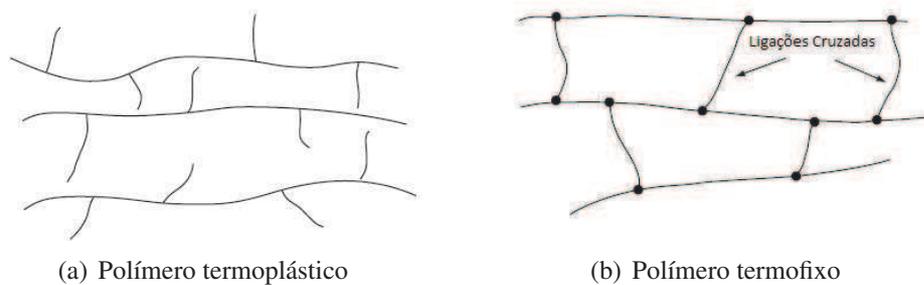


Figura 13: Representação de um polímero termoplástico e termofixo

Fonte: Adaptado de Chawla (2013)

As características mecânicas de um polímero em estado sólido dependem da temperatura de trabalho e da taxa de aplicação de carga. Se a temperatura estiver acima da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), o polímero geralmente exibirá baixa dureza superficial, baixo módulo de elasticidade e alta ductibilidade. Se a temperatura estiver abaixo da  $T_g$ , a maioria dos polímeros apresenta comportamento frágil (como mostrado na figura 14). Segundo Mallick (2007), os efeitos do carregamento se dão de forma oposta aos da temperatura. Se submetidos a uma aplicação de carga lenta os polímeros podem se comportar de maneira dúctil, apresentando alta resistência à fratura. Em incrementos de carga rápidos, o mesmo polímero pode se comportar de maneira rígida e frágil.

Os polímeros mais utilizados como matriz de laminados compósitos reforçados por fibras são o epóxi e o poliéster, ambos termofixos. Utilizados não somente pelas suas características mecânicas, frequentemente superiores a dos termoplásticos, mas também devido à sua estabilidade térmica que confere maior confiabilidade dimensional. (MALLICK, 2007).

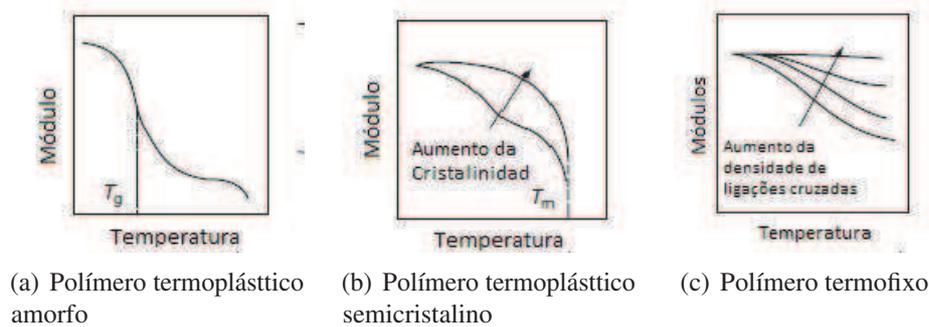


Figura 14: Variação do módulo de elasticidade para três diferentes tipos de polímeros

Fonte: Adaptado de Mallick (2007)

### 3.1.3.2 Matrizes Metálicas

Segundo Mallick (2007), matrizes metálicas são utilizadas em aplicações que requerem resistência a condições extremamente severas de trabalho, como por exemplo, alta temperatura. Se comparados a polímeros, a maioria dos metais apresentam módulo e limite de escoamento superiores, os tornando adequados à aplicações que necessitem de alta resistência transversal e a compressão. Outra vantagem do uso de metais como matrizes, é que suas propriedades podem ser alteradas através de uma série de tratamentos térmicos e mecânicos específicos. Em contrapartida, possuem alta densidade, alto ponto de fusão (o que implica em altas temperatura de processo) e tendência à corrosão na interface fibra/matriz. Alumínio e titânio são os metais mais comuns aplicados como matrizes, ambos possuem baixa densidade se comparados com outros metais e estão disponíveis em uma grande variedade de composições químicas diferentes.

### 3.1.3.3 Matrizes Cerâmicas

Materiais cerâmicos são de alta dureza e frágeis. Geralmente consistem de átomos de um ou mais metais combinados com um não metal, como oxigênio, carbono, ou nitrogênio. Possuem fortes ligações covalentes e poucos defeitos em sua estrutura cristalina, se comparados com os metais (CHAWLA, 2013). São conhecidos por serem estáveis em altas temperaturas, possuem alta resistência a choques térmicos, alta dureza, alta resistência à corrosão e baixa densidade (MALLICK, 2007). A principal razão para se reforçar uma matriz cerâmica é aumentar sua resistência à fratura. Alumina ( $Al_2O_3$ ) e carbetos de silício ( $SiC$ ) são dois dos principais materiais cerâmicos utilizados e são conhecidos principalmente por sua estabilidade térmica e química.

## 3.2 Nanocompósitos

### 3.2.1 Nanocompósitos poliméricos

Tradicionalmente, polímeros têm sido reforçados pela a adição de inúmeras partículas sintéticas ou inorgânicas com o intuito de melhorar suas propriedades ou mesmo reduzir custos. Os materiais de reforço mais comuns se encontram na forma de partículas (ex.:carbonato de cálcio), fibras (ex.: fibra de vidro), ou na forma lamelar (ex.: mica), geralmente possuindo dimensões micrométricas (PAVLIDOU; PAPASPYRADES, 2008). Por sua vez, nanocompósitos poliméricos são sintetizados pela dispersão de partículas em sistemas poliméricos, nas quais pelo menos uma de suas dimensões se encontra na faixa nanométrica. Estes compósitos nanoestruturados têm apresentado significante melhora em diversas propriedades em comparação com os materiais compósitos tradicionais: resistência a fratura, resistência ultima, resistência à variações bruscas de temperatura, resistência ao desgaste, entre outras. (CHOI; AWAJI, 2005). A redução nas dimensões do reforço, da escala micrométrica para a escala nanométrica pode resultar numa gama inteiramente nova de propriedades (THOSTENSON et al., 2005). Naganuma e Kagawa (2002), demonstraram que em compósitos de  $SiO_2$ /epoxy a redução no tamanho da partícula aumentou a transmitância do espectro de luz visível. Thompson et al. (2003) estudando filmes de nanocompósitos constituídos de óxidos metálicos e poliamida concluiu que a adição de reforços em escala nanometrica é capaz de resultar em compósitos de mais alta rigidez.

Thostenson et al. (2005) discute que uma das características morfológica mais importante para o entendimento da influencia do tamanho do reforço é a sua relação área superficial/volume. Para particulados, materiais lamelares e fibrosos a redução das dimensões de micrometro para nanômetro altera a relação área superficial/volume em três ordens de grandeza como mostrado na FIG. 15. Nesta escala, devido ao aumento do tamanho da interface entre o reforço e a matriz, a interface passa a desempenhar um papel dominante nas propriedades do compósito. Este fenômeno foi observado por Cannillo et al. (2006). Em seu estudo sobre as propriedades elásticas efetivas utilizando um sistema poly-caprolactone/sílica, o modelo computacional baseado em elementos finitos mostrou claramente a influencia da interface entre reforço e matriz. Enquanto os modelos bifásicos clássicos utilizados para compósitos falharam na predição das propriedades dos nanocompósitos, o modelo computacional trifásico (reforço, interface, matriz) mostrou resultados condizentes com os observados experimentalmente.

Como dito por Hussain et al. (2006) as propriedades finais de nanocompósitos são influenciadas principalmente pelo tamanho de suas fases, as frações mássicas de matriz e reforço utilizadas e pelo grau de dispersão do aditivo. A FIG. 16 exemplifica através de uma nanoestrutura lamelar as possíveis formas em que o material disperso pode ser encontrado no interior da matriz.

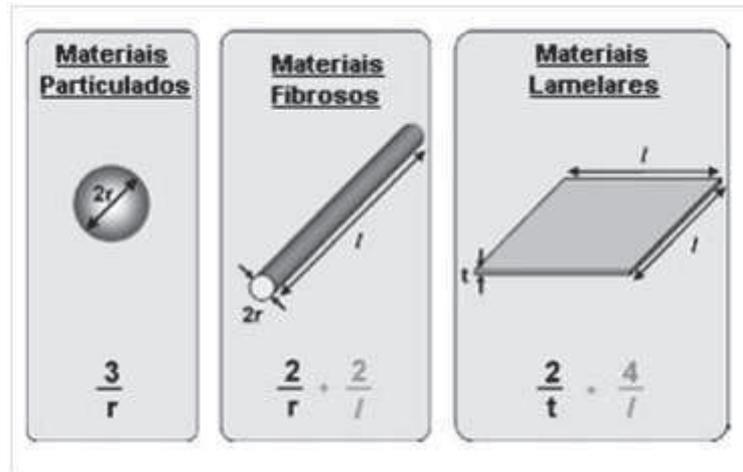


Figura 15: Relações área/volume para várias geometrias do reforço

Fonte: Adaptado de Thostenson et al. (2005)

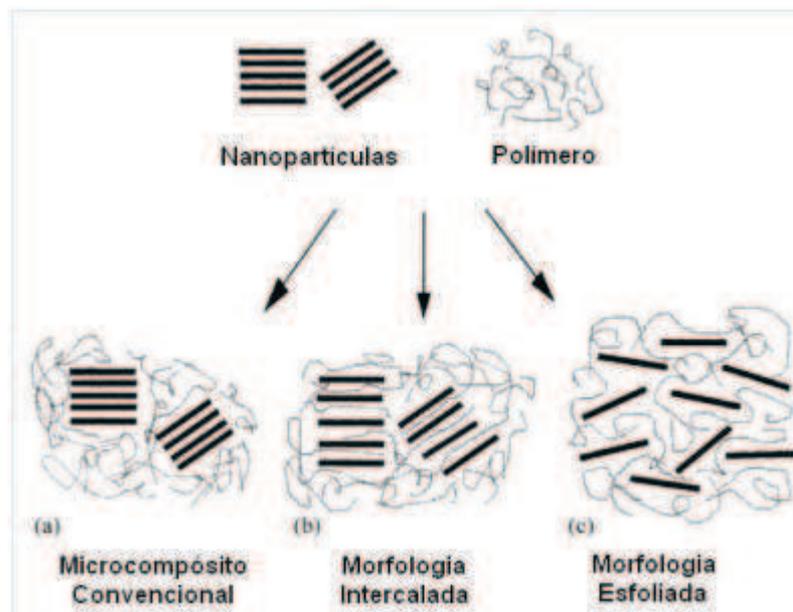


Figura 16: Representação esquemática dos tipos de nanoestruturas.

Fonte: Adaptado de Hussain et al. (2006)

De acordo com Pavlidou e Papispyrades (2008) nem toda mistura polímero/nanoestrutura é capaz de formar um nanocompósito. Na maioria dos casos ocorre a separação entre fases discretas. A baixa interação entre os componentes orgânicos e inorgânicos leva à formação de aglomerados de nanoestruturas cujas propriedades estão na mesma faixa dos microcompositos tradicionais (GIANNELIS, 1996). Estruturas intercaladas são formadas quando uma ou mais cadeias poliméricas penetram entre as camadas lamelares. Este processo resulta em uma estrutura bem ordenada de camadas alternadas de polímeros e camadas inorgânicas. Por fim, a estrutura esfoliada é obtida quando as lamelas da nanoestrutura se encontram bem separadas uma das outras

e individualmente dispersas na matriz (PAVLIDOU; PAPASPYRADES, 2008). Geralmente, as estruturas esfoliadas são as que apresentam maiores alterações nas propriedades mecânicas e físicas, uma vez que esta configuração permite que a total superfície da nanoestrutura esteja disponível para interagir com o polímero (BEYER, 2002). Estruturas completamente esfoliadas são raramente alcançadas, sendo a estrutura mista (intercalada e esfoliada) mais comumente observada, como mostrado na FIG. 17.



Figura 17: Microscopia TEM de um nanocompósito de montmorillonita, mostrando ambas as morfologias intercaladas e esfoliadas

Fonte: Adaptado de Thostenson et al. (2005)

### 3.2.2 Nanopartículas

Segundo Thostenson et al. (2005) nanopartículas geralmente possuem dimensões entre 1 nm e 100 nm e podem ser divididos em três grupos: particulado (sílica, metal e outras partículas orgânicas e inorgânicas), lamelares (grafite, silicatos lamelares entre outros minerais lamelares) e materiais fibrosos (nanofibras e nanotubos). Sua utilização está ligada a que tipo de propriedades se deseja alcançar. Nanoparticulados como sílica e metais podem ser utilizados para melhorar o módulo de elasticidade e a tensão de escoamento. Montmorillonita, saponita e mica sintética (materiais lamelares) são utilizadas para promover melhorias na rigidez, na resistência mecânica, na estabilidade térmica e na permeabilidade de gases. Grafite/grafeno (lamelar) e nanotubos

de carbono (material fibroso) são utilizados devido a seu alto módulo de elasticidade e tensão última de ruptura, alta condutividade térmica e baixa resistividade elétrica.

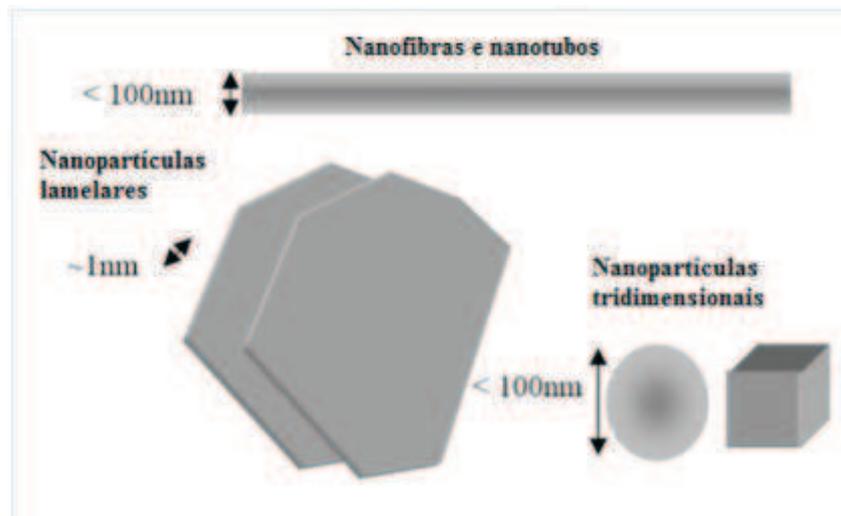


Figura 18: Representação esquemática dos tipos de nanopartículas

Fonte: Adaptado de Ajayam et al. (2005)

### 3.2.2.1 Grafeno

O grafeno pode ser definido como o bloco básico de construção de todas as formas gráficas do carbono. Consiste de uma única camada atômica de átomos hibridizados de carbono ( $sp^2$ ) arranjados numa estrutura colmeia (honeycomb) como mostrado na FIG. 19 (YOUNG et al., 2012). Desde o primeiro relato da preparação e isolamento de uma única camada de grafeno, o interesse no estudo de suas propriedades cresceu rapidamente. Pesquisas rapidamente mostraram que o grafeno é um dos mais excitantes tópicos na ciência dos materiais, possuindo interessantes propriedades como altos níveis de rigidez e resistência mecânica, alta condutividade térmica, impermeabilidade a gases, entre outras. O grafeno tornou-se então uma promissora perspectiva para aplicação no campo de nanocompósitos (YOUNG et al., 2012) e (GEIN; NOVOSELEV, 2007).

Desde sua primeira observação em 2004, muito se têm estudado sobre as formas de obtenção do grafeno. As mais comuns envolvem a quebra do grafite através de técnicas como clivagem mecânica ou exfoliação em fase líquida (estas técnicas muitas vezes são conhecidas como “top-down” uma vez que partem da quebra de uma estrutura macro até se alcançar seu bloco básico de constituição). Outra técnica também empregada na síntese de grafeno é a deposição química a vapor (CVD) que permite o crescimento da folha de grafeno sobre um substrato específico (geralmente metais) (YOUNG et al., 2012).

As propriedades mecânicas de monocamadas de grafite foram medidas por Lee et al. (2008) atra-

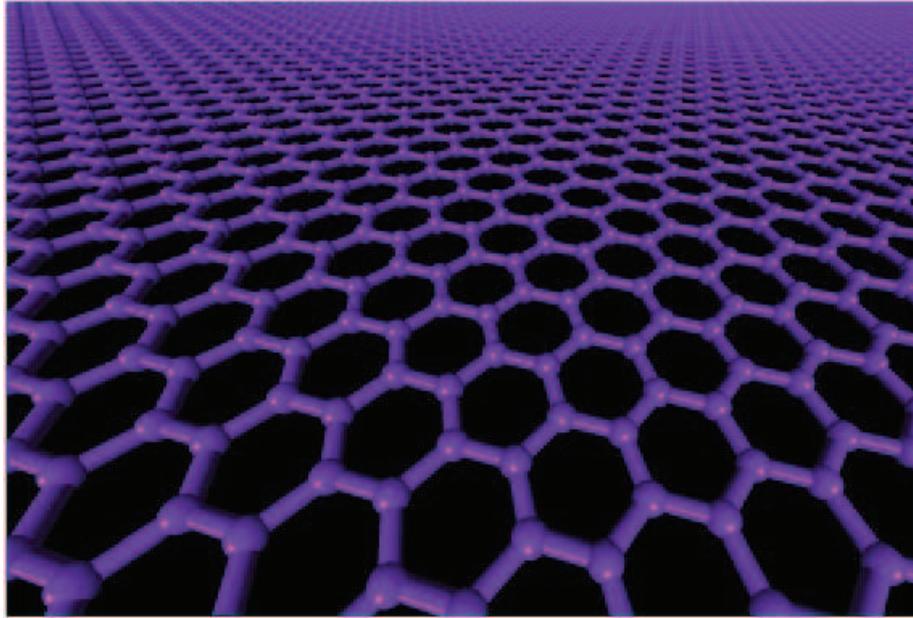


Figura 19: Modelo molecular de uma única camada de grafeno

Fonte: Adaptado de Young et al. (2012)

vés da nanoindentação de membranas de grafeno. O módulo de Young medido experimentalmente foi de  $1000 \pm 100$  GPa e a resistência intrínseca foi de  $130 \pm 10$  GPa. O grafeno também possui outras interessantes propriedades: condutividade térmica elevada ( $4840 - 5300 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ), mobilidade eletrônica excedendo  $25000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ , excelente impermeabilidade gasosa e área superficial de  $2630 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  (MITTAL, 2014).

As macropropriedades dos nanocompósitos dependem principalmente de fatores como a compatibilidade interfacial do polímero com o reforço, da dispersão, do tamanho e forma da nanopartícula (MITTAL, 2014). No entanto, a dispersão e a compatibilidade superficial entre as nanopartículas e o polímero ainda são desafios a serem superados. Gong et al. (2010) demonstrou em seu estudo que a tensão cisalhante na interface polímero-grafeno na ruptura é da ordem de 1 MPa. Relativamente pobre se comparada com a tensão interfacial apresentada pelos polímeros reforçados por fibra de carbono, que varia da ordem de 20-40 MPa. Devido a estes fatores é muito comum a funcionalização da superfície da nanopartícula ou a polarização do polímero através da adição de compatibilizadores, a fim de promover uma melhor interação interfacial entre as fases (MITTAL, 2014).

A grande maioria dos trabalhos desenvolvidos nesta área utiliza no lugar do grafeno, o óxido de grafeno. O óxido de grafeno possui muitos atrativos se comparado ao grafeno, uma vez que pode ser obtido em grandes quantidades, é mais fácil de esfoliar e dispersar em matriz polimérica e possui grupos funcionais disponíveis para formar ligações interfaciais fortes com a matriz. Além disso, pode ser esfoliado em água o que permite a preparação de nanocompósitos com

polímeros solúveis e não solúveis em água (YOUNG et al., 2012). Porém, a redução do grafite em óxido de grafeno utiliza hidrazina, que não é adequado ao meio ambiente. Neste contexto vale a pena destacar que a palavra grafeno tem sido usado tanto para o grafeno quanto para o óxido de grafeno, o que torna difícil dizer qual a verdadeira natureza do trabalho apenas pelo seu título.

Achaby e Quaiss (2013) comparou o desempenho de nanocompósitos de grafeno e de MWCNTs em matriz de polietileno de alta densidade. A uma concentração de 3% em peso de grafeno, a resistência à tração do nanocomposito foi 77% maior que a da resina pura, enquanto a mesma concentração de nanotubos promoveu um aumento de 58%. De forma similar, o módulo de elasticidade dos nanocompósitos de grafeno e nanotubo aumentou respectivamente 87% e 57% se comparado ao polímero em seu estado original.

Milani et al. (2013) investigou a síntese e propriedades de nanocompositos baseados em polipropileno isotático e grafeno. Em seu estudo ele observou um aumento no modulo de elasticidade de 1280 MPa da resina pura para 1920 MPa no nanocomposito e um aumento na condutividade elétrica na ordem de  $10^8$  em relação à resina pura. Yadav e Cho (2013) observou um aumento de mais de dez vezes no modulo de elasticidade de nanocompositos baseados em poliuretano e grafeno funcionalizado em comparação com o polímero puro. Kuilla et al. (2009) reportou um aumento de 400% na condutividade térmica ao adicionar 5% de óxido de grafeno em resina epóxi, Um aumento significativo na condutividade térmica comparável àquele obtido com a adição de nanotubos de parede múltipla também foi observado. Zaman et al. (2011) sintetizou um nanocomposito epóxi/grafeno combinando mistura por ultrassom e funcionalização. Os compósitos com 4% de grafeno quimicamente modificado apresentaram uma energia de fratura de  $613,4 Jm^{-2}$ , enquanto os nanocompositos não modificados quimicamente e a resina epóxi pura apresentaram valores de  $417,3 Jm^{-2}$  e  $204,1 Jm^{-2}$ , respectivamente.

Shen et al. (2013) observou melhorias significantes no comportamento tribológico de nanocompósitos sintetizados através da adição de pequenas concentrações (0.05% - 0.5% wt.) de óxido de grafeno em matriz epóxi. A 0.5% wt. a redução na taxa específica de desgaste foi de 90 - 94.1% em comparação com a resina pura.

Avila et al. (2010) demonstrou que a adição de grafeno em matriz polimérica de laminados de fibra de carbono melhora a resistência à chamas. Para amostras em forma de viga curta a adição do grafeno aumentou a área não queimada de 0,16 mm para 2,74 mm, enquanto nas amostras na forma de pequenas placas a resistência foi reduzida em cerca de 12,8%. Neto et al. (2013) investigou o uso de adesivo epóxi nanomodificado pela adição de folhas de grafeno. A adição de 2% em massa de nanoparticulas na matriz epóxi promoveu um aumento de 57% na capacidade de carga e 22% na rigidez dos adesivos.

### 3.2.2.2 Nanotubos de Carbono

O nanotubo de carbono é uma estrutura cilíndrica com extremidades semi-esféricas formada por átomos de carbono ligados entre si através de ligações covalentes ( $sp^2$ ) (PEREIRA, 2013). Essa estrutura foi primeiramente reportada em 1991 por Iijima (1991), mas relatos da existência de estruturas carbonicas “worm-like” datam à década de 1950, quando pesquisadores russos observaram a formação de longos filamentos de cristais carbônicos com diâmetro aproximado de 50 nm na fuligem resultante da composição de CO sobre partículas de ferro a 600 C. Porém devido às limitações dos equipamentos disponíveis (a resolução do TEM empregado na análise era muito baixa, cerca de 5-6 nm) não foi possível a exata identificação das estruturas observadas (MARINKOVIC, 2008).

Existem basicamente dois tipos de nanotubos de carbono (CNTs – “carbon nanotubes”): de parede única (SWCNTs – “single-wall carbon nanotubes”) e de paredes múltiplas (MWCNTs – “Multi-wall carbon nanotubes”), mostrados respectivamente pelas FIG.20 e FIG.21. SWCNTs foram observados e tiveram o seu processo de síntese descritos primeiramente em 1993, por Iijima (1991). Morfologicamente podem ser comparados a uma folha de grafeno enrolada, possuindo na extremidade uma estrutura semiesférica derivada a partir de um fulereno ( $C_{60}$ ) (PEREIRA, 2013). Comercialmente, SWCNT são encontrados com diâmetros variando entre 0,3 e 2 nm e com comprimento até 50  $\mu m$ s (KANG et al., 2006). MWCNTs podem ser considerados como um conjunto de SWCNTs concêntricos com diferentes diâmetros. Como sua constiuição (comprimento, diâmetro e número de paredes) difere muito de SWCNTs sua propriedades também são muito distintas (PEREIRA, 2013).

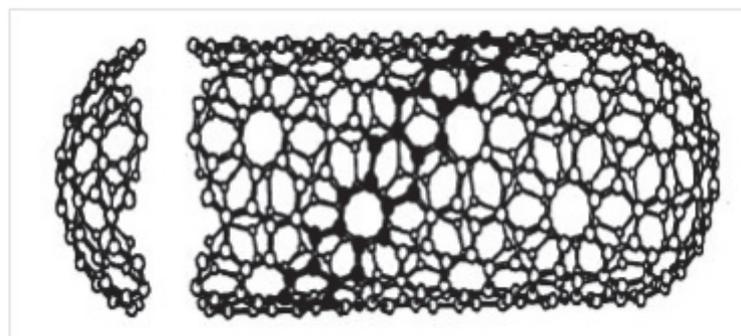


Figura 20: Modelo molecular de uma única SWCNTs

Fonte: Adaptado de Marinkovic (2008)

As excepcionais propriedades dos nanotubos de carbono tem atraído a atenção de inúmeros pesquisadores e aberto uma nova e vasta área de pesquisa desde a sua descoberta. Apesar da dificuldade em se manipular objetos em escala nanométrica, vários artigos na literatura reportam medições experimentais diretas do módulo de Young de CNTs (PRASEK et al., 2011). Treacy et al. (1996) concluiu em seus experimentos que o módulo de elasticidade SWCNTs varia entre

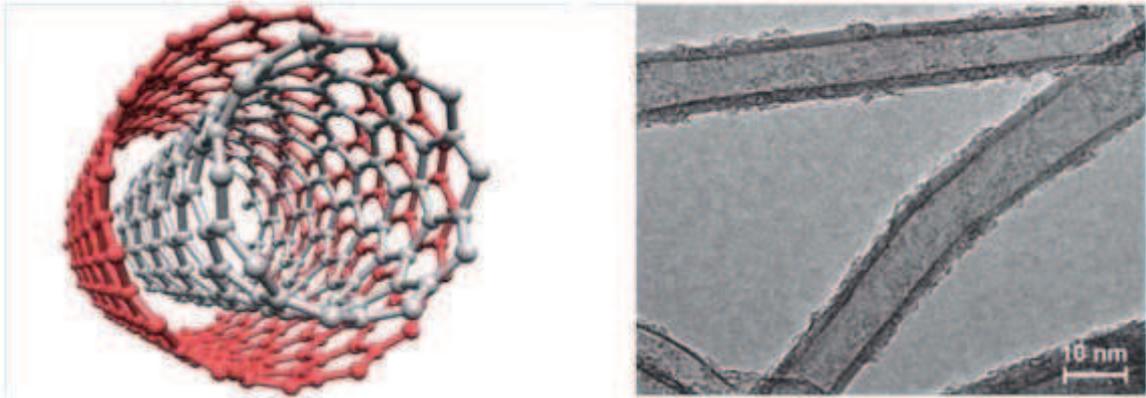


Figura 21: Modelo molecular de uma única MWCNTs

Fonte: Adaptado de Prasek et al. (2011)

0,9 a 1,9 TPa. Krishman et al. (1998) chegaram a resultados de  $1,3 \pm 0,4$  TPa. Hernandez et al. (1998) obtiveram valores de 1,24 TPa. Popov e Doren (2000) encontraram valores próximos a 1,0 TPa. A grande variabilidade dos resultados pode ser atribuída às formas de medição e à dificuldade de manipular estruturas tão pequenas.

Para os MWCNTs, os estudos mostram resultados diferentes dos encontrados para os SWCNTs, decorrentes principalmente da interação entre os vários tubos concêntricos que se dá principalmente por forças de Van der Waals. Natsuki et al. (2004) obteve valores de 0,8 a 1,6 TPa para o módulo de elasticidade de MWCNTs. Valores diferentes do obtido por Wong et al. (1997), que em seu estudo encontrou  $1,28 \pm 0,59$  TPa. A TAB. 2 resume os valores encontrados tipicamente para as principais propriedades mecânicas de CNTs, assim como os comumente usados.

Tabela 2: Propriedades mecânicas de nanotubos

PROPRIEDADE	FAIXA DE VALORES	VALORES MAIS USADOS
$t[mm]$	0,066-0,69	0,34
$E[TPa]$	0,27-5,50	1,0
$G[TPa]$	0,20 - 0,50	0,5
$\nu$	0,12 - 0,28	-
$\sigma_{rup}[GPa]$	11 - 300	11 - 63
$\varepsilon[mm/mm]$	0,12 - 0,30	> 0,10

Fonte: Adaptado de Pereira (2013)

Eletricamente, SWCNTs possuem baixa resistividade variando entre  $4 \Omega cm$  e  $10 \Omega cm$  e suportam a maior densidade de corrente entre todos os materiais conhecidos  $10^9 A/cm^2$ . Quanto as propriedades térmicas, CNTs são estáveis a  $2800^\circ C$ , com condutividade térmica variando entre  $17500 W/mK$  a  $5800 W/mK$  (PEREIRA, 2013).

Devido à essas formidáveis características, muito têm-se estudado sobre a aplicação de CNTs

como reforço em materiais compósitos, principalmente de matrizes poliméricas. Tai et al. (2004) sintetizou um nanocompósito baseado em resina fenólica e MWCNTs com diâmetro inferior a 50 nm e comprimento superior a 10  $\mu m$ , em seu estudo ele reportou aumento tanto no módulo de elasticidade como na resistência final devido a adição de nanotubos. Gojny et al. (2004) desenvolveu um nanocompósitos através da dispersão de MWCNTs em resina polimérica. O material resultante mostrou significativo aumento no módulo de elasticidade, na deformação até falha e na resistência a fratura, mesmo para pequenas quantidades dispersas (0.1 wt.%). Ogasawara et al. (2004) reforçou feniletil-poliamida com MWCNTs, observando considerável aumento tanto no módulo de elasticidade, como na resistência final do compósito. Os resultados obtidos estão listados na tabela 3.

Tabela 3: Propriedades of CNT/poliamida nanocompositos

CNT (wt.%)	CNT (V%)	E (GPa)	$\sigma_{rup}$	$\varepsilon_{max}$ (%)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)
0	0	2.84	115.6	7.6	69.8
3.3	2.3	3.07	99.5	4.0	90.5
7.7	5.4	3.28	97.6	3.6	84.6
14.3	10.3	3.90	95.2	2.6	92.6

Fonte: Adaptado de Ogasawara et al. (2004)

Frogley et al. (2003) adicionou SWCNTs em matriz de silicone. Os testes mostraram um aumento inicial no módulo de elasticidade acompanhado por uma redução no limite de resistência. As análises de espectroscopia mostraram uma redução na transferência de tensão da matriz para o reforço em aproximadamente 10-20% de deformação, sugerindo a quebra da interface polímero-nanoestrutura.

Gojny et al. (2005b) testou o comportamento de resinas epoxidílicas reforçadas com nanotubos funcionalizados e não funcionalizados. De acordo com os resultados obtidos, foi observado um aumento de 43% na resistência à fratura da resina com adição de 0,5% de nanotubos (DWCNTs) funcionalizados. Em outro trabalho, Gojny et al. (2005a) mostraram através de seu estudo que para compósitos de fibra de vidro em matriz epoxi modificada pela adição de 0,3 wt% MWCNTs-NH<sub>2</sub> (amino-funcionalizados) que a resistência à delaminação é 19% maior que a apresentada pelo compósito tradicional.

Gouda et al. (2013) analisou o comportamento de compósitos híbridos (grafeno mais CNTs) utilizando diferentes concentrações de grafeno e MWCNTs até o limite de 0,2 wt.% para cada uma das nano estruturas. Ele observou um aumento no módulo de elasticidade entre 10 – 15% para os compósitos reforçados com 0,2% de grafeno e nanotubos e um aumento de 35.4% na resistência à flexão nos espécimes sem adição de grafeno. Além de um aumento na dureza de 12,34% para a adição de 0,2% grafeno e 8,5% para a adição de 0,2% CNT.

Seyhan et al. (2008) observaram o comportamento de compósitos de fibra de vidro (E-glass)/Estireno nano modificados pela adição de 0,1 wt.% MWCNTs amino-funcionalizados (MWCNTs-NH<sub>2</sub>).

Em comparação ao compósito tradicional, os nanocompósitos apresentaram um aumento de 8% na resistência à fratura ao MODO II e um aumento na resistência à delaminação de 11%. O comportamento do material à fratura pelo MODO I permaneceu inalterado.

Bilge et al. (2012) sintetizaram fibras de copolímeros e MWCNTs utilizando eletrospinning e as utilizaram como camada intermediária de reforço entre as camadas de fibras. Eles observaram um aumento da resistência a flexão e da rigidez em torno de 17%, da absorção de energia de impacto em 20% e da resistência a tração transversal de 27%.

Ichkitidze et al. (2013) usaram gel eletricamente conductor na forma de uma solução aquosa de carboximetil celulose (4 wt.% CMC) e 5 wt.% de MWCNTs para criar substratos sólidos, afim de investigar a influencia da adição de CNTs na condutividade elétrica de polímeros. Os nanocompósitos criados apresentaram condutividade de 4 – 6 vezes a ordem de grandeza das amostras de controle baseada somente em carboximentil celulose.

Baseado nos resultados mostrados na literatura parece que a adição de nanoestruturas de base carbono (CNT's e grafeno) promovem melhorias nas propriedades mecânicas, elétricas e térmicas dos compósitos.

### 3.3 Uniões Adesivas

Segundo Banea e Silva (2009), a união adesiva é um processo mecânico no qual um adesivo é posto entre duas superfícies a serem unidas (aderentes), se solidificando e permitindo a união das mesmas. Os adesivos funcionam devido a propriedade da adesão. Segundo Ebnesajjad (2008), a adesão, apesar de difícil definição, consiste em um estado no qual dois corpos dissimilares são mantidos unidos por um contato interfacial íntimo de forma que forças mecânicas ou trabalho possam ser transferidas através da interface. As forças interfaciais que mantêm as fases unidas podem se originar de forças de van der Waals, ligações químicas ou atração eletrostática. Segundo Bueno (2002), existem dois tipos básicos de uniões adesivas:

- **União estrutural:** a união tem a função de transmitir esforços mecânicos. Para tal o adesivo deve ser capaz de suportar as cargas operacionais sem perder sua integridade, dentro dos limites de projeto. Normalmente adesivos estruturais apresentam resistência ao cisalhamento superior a 7MPa.
- **Uniões não-estruturais:** são aqueles em que o adesivo não tem função de transmitir esforços, sendo usado com outros propósitos: selamento contra vazamentos, amortecimento de vibrações, etc;

Redução de peso estrutural e aumento da resistência à fadiga foram os dois primeiros grandes impulsionadores para o uso extensivo de uniões adesivas, porém inúmeras outras vantagens fazem deste tipo de processo uma promissora alternativa aos métodos comuns de união. Uma destas principais vantagens para o uso de uniões adesivas reside no fato da carga ser transmitida de maneira mais uniforme entre os aderentes. Esta maior uniformidade na transmissão de tensões se torna de extrema importância, sobretudo para a aplicação em materiais compósitos, onde os métodos comuns de fixação na maioria das vezes se mostram inadequados. A criação de furos para passagem de rebites e parafusos em materiais compósitos leva ao corte das fibras de reforço, causando uma redução da capacidade global de carga da estrutura. Em juntas coladas, no entanto, o adesivo funciona como um meio contínuo de transmissão de esforços onde o módulo de cisalhamento do adesivo, o módulo de elasticidade dos aderentes e a geometria da junta controlam a distribuição de tensão na camada de adesivo (GANESH; CHOO, 2002).

Segundo Bueno (2002), além de permitir a união de componentes, os adesivos podem desempenhar outras funções importantes. Adesivos flexíveis, por exemplo, podem acomodar diferentes coeficientes de expansão térmica entre os aderentes, também sendo úteis para promover o amortecimento mecânico devido ao seu alto atrito interno. São muito usados para conferir estanqueidade ou selamento a estruturas, decorrente da natureza contínua da união formada.

### 3.3.1 Vantagens e Desvantagens

A união adesiva permite a junção de materiais sem causar alteração em suas microestruturas, ou seja, deixando-os praticamente inalterados quimicamente. Esta característica faz das uniões adesivas o caminho mais adequado para unir materiais similares ou dissimilares, tais como: metais com polímeros, cerâmicos com polímeros, metais com compósitos de matriz orgânica, entre outros (BUENO, 2002). Neto (2011) destaca uma série de vantagens do uso de uniões adesivas:

- Permite união adequada de materiais finos e espessos de quaisquer formas;
- Confecção de juntas com contornos suaves e aerodinâmicos;
- Proporciona uma boa relação resistência/peso sendo frequentemente mais rápido e ou mais barato que as fixações mecânicas
- A distribuição uniforme de tensões e redução de concentradores de tensão;
- A existência de uma maior área de transmissão de carga, implicando em um maior potencial de cargas;
- Minimiza ou previne corrosão eletroquímica entre materiais dissimilares.

- Possuem melhor resistência à fadiga e à cargas cíclicas;

As desvantagens do uso de adesivos estão relacionadas principalmente ao processo de fabricação e ao controle de qualidade das mesmas. Bueno (2002) lista como principais desvantagens do uso de adesivo em uniões:

- Cuidadosa preparação do aderente para obter uniões duráveis;
- Controle rígido do processo para conseguir máxima união;
- Necessidade de longos tempos de cura, onde se pode ou não utilizar altas temperaturas;
- Não visualização direta da área colada fazendo com que a inspeção visual seja difícil;
- Dificuldade no reparo de juntas defeituosas ou deficientes;
- Temperatura de serviço limitadas em 180 °C na maioria dos casos, chegando a 370 °C no caso de adesivos especiais (usualmente de alto custo);
- Vida útil da junta depende criticamente do ambiente na qual ela é exposta;

### 3.3.2 Projeto de Juntas Adesivas

Juntas adesivas devem ser projetadas particularmente para uso de adesivos. A modificação de juntas projetadas para outros métodos de fixação para união adesiva, muitas vezes conduz a resultados inadequados (CRUZ, 2013). Em um projeto de juntas unidas por adesivos, as características básicas do adesivo ditam o comportamento do projeto, apesar das características dos aderentes também possuem um papel importante. Desta forma, juntas coladas devem ser projetadas para obter máxima resistência, minimizando os concentradores de tensões e maximizando a área de colagem, sempre que possível (BUENO, 2002). A resistência de uma junta colada pode ser determinada principalmente pelos seguintes fatores:

- Geometria da junta
- Propriedades mecânicas do adesivo e do aderente;
- Tensões residuais internas geradas durante o processo;
- Grau de contato interfacial alcançado através da aplicação e molhamento do adesivo;
- Tipo de carregamento com o qual a junta é submetida.

### 3.3.3 Configurações de Juntas

Segundo Cruz (2013) existe uma grande variedade de configurações geométricas possíveis para uma junta colada, das quais, as mais analisadas na literatura são: "single-lap", "double-lap", "single-lap"chanfrada, biselada, de topo com contraforte e com duplo contraforte. Essas juntas são mostradas na figura 22.

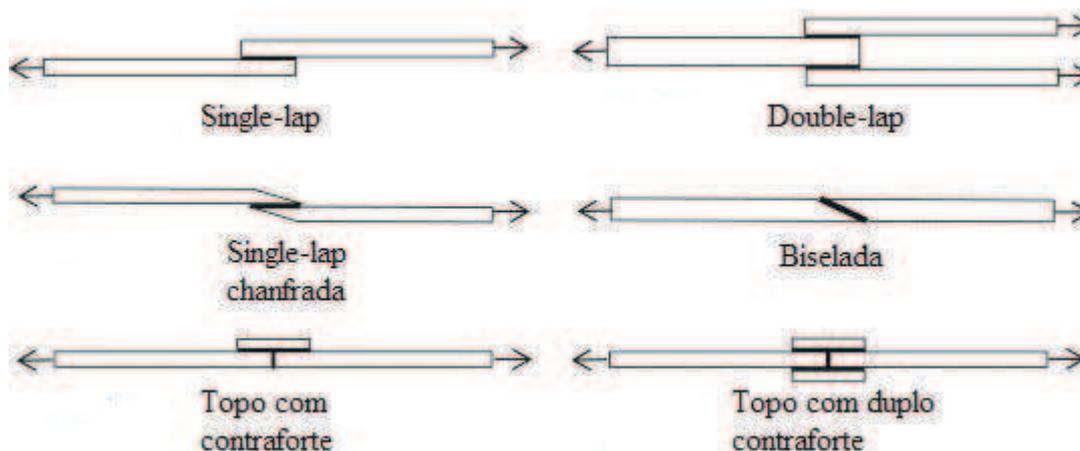


Figura 22: Configurações de juntas adesivas comumente usadas

Fonte: Adaptado de Cruz (2013)

Devido a sua simplicidade e eficiência, a junta “single-lap” se tornou a configuração mais utilizada. No entanto, um dos problemas associados a este tipo de junta está no fato das tensões de cisalhamento e “peel” estarem concentradas nas extremidades da região de superposição. Isto ocorre principalmente devido ao carregamento não ser colinear, o que leva à flexão do aderente e rotação da região de sobreposição. Raramente o modo de falha de uma junta “single-lap” é controlado pela resistência ao cisalhamento do adesivo, mas sim pelos efeitos da rotação, flexão e pela tensão de “peel” induzida. Devido a isto, os dados obtidos dos ensaios deste tipo de junta não podem ser usados como informações para projeto, mas são frequentemente utilizados como parâmetros de comparação entre adesivos. Banea e Silva (2009).

### 3.3.4 Características dos Adesivos

Segundo Banea e Silva (2009) adesivos utilizados em aplicações estruturais incluem: epóxis, cianocrilatos, anaeróbicos, acrílicos, poliuretano, silicones e adesivos para alta temperatura (fenólicos, poliamidas e bismaleimidas). A seleção de uma adesivo, por sua vez, inclui muitos fatores como o tipo e a natureza dos aderentes, cura e método de aplicação do adesivo e expectativa de carga que a estrutura deverá suportar em serviço. Em alguns casos o custo do

adesivo pode se tornar um fator de seleção importante. Banea e Silva (2009) listam as principais características para os tipos de adesivos mais utilizados.

- **Epoxi:** Alta resistência mecânica e à temperatura, baixa temperatura de cura, fácil manuseio e baixo custo. Possuem temperatura de serviço variando entre -40 e 180 °C.
- **Cianocrilatos:** Capacidade de colagem rápida (segundos ou minutos, quando expostos ao ambiente) para plásticos e borrachas, mas possuem baixa resistência à umidade e temperatura. Possuem temperatura de serviço variando de -30 a + 80°C.
- **Anaeróbicos:** Desenvolvidos para aplicações de colagem rápida e de selamento, no qual a ligação adesiva deve ser formada na ausência de luz, calor ou oxigênio. As temperaturas de serviço variam entre -55 a 150 °C.
- **Acrílicos:** São adesivos versáteis com capacidade de cura rápida e toleram superfícies menos preparadas. Operam em uma faixa de temperaturas variando entre -40 e 120 °C.
- **Poliuretanos:** Possuem boa flexibilidade em baixas temperaturas e boa resistência à fadiga e ao impacto, além de possuir boa durabilidade. O processo de cura se dá à temperatura ambiente e são capazes de operar entre -200 e +80 °C.
- **Silicones:** São excelentes selantes para aplicações onde a sollicitação mecânica é de pequena magnitude, possuindo alto grau de flexibilidade, capacidade de selar e unir materiais de naturezas diversas, longo tempo de cura (realizada em temperatura ambiente) e baixa resistência mecânica. Operam em temperaturas variando entre -60 e +300 °C.
- **Fenólicas:** Possuem boa resistência de retenção por curtos períodos de tempo e baixa resistência a choque térmico. Sua cura se dá sob a aplicação de temperatura e pressão. São indicados para aplicações cuja a temperatura não exceda a faixa de -40 a +175 °C.
- **Poliamidas:** Possuem excelente estabilidade térmica, porém suas características são dependentes de inúmeros fatores. De difícil processamento, sua cura ocorre sob temperatura e alta pressão. Operam entre -40 e +250°C.
- **Bismaleimidas:** São extremamente rígidas e com baixa resistência a esforços de “peel”. Sua cura ocorre sob alta pressão e temperatura. Operam entre -50 e 200°C.

### 3.3.5 Mecanismos de Falha

Juntas coladas podem falhar por diferentes motivos. Os dois mecanismos de falha predominantes em juntas adesivamente unidas são a falha por coesão e a falha por adesão. A falha adesiva é a falha interfacial entre o adesivo e um dos aderentes e tende a indicar a existência de uma interface adesivo/aderente fraca, frequentemente ocasionada pela preparação imprópria da superfície a

ser colada. A falha coesiva por sua vez ocorre quando a fratura resulta numa camada de adesivo que permanece unida à superfície dos aderentes, ou mais raramente quando o aderente falha antes do adesivo, com a fratura totalmente contida no substrato (NETO, 2011). Segundo Banea e Silva (2009) os modos de falha são determinados pela qualidade da região de colagem em cada interface, geometria do espécime e carregamento ao qual é submetido. A identificação e a completa caracterização dos modos de falha se faz indispensável para o entendimento das propriedades do adesivo e da junta sob investigação.

Para juntas coladas, nas quais o aderente é um material polimérico reforçado por fibras, a norma ASTM D5573 (2012) define sete tipos de falhas:

- Falha Adesiva (ADH – “adhesive failure”): A ruptura da junta colada é de tal maneira que a separação ocorre na interface adesivo-aderente. Este tipo de falha também é chamado de falha interfacial.
- Falha coesiva (COH – “cohesive failure”): A separação da junta ocorre no interior da camada de adesivo.
- Falha adesiva de fina camada (TLC – “thin-layer cohesive failure”): Similar à falha coesiva, porém a separação ocorre muito próxima da interface adesivo-aderente, caracterizada pela permanência de uma fina camada de adesivo sobre o aderente.
- Falha de rompimento da fibra (FT – “fiber-tear failure”): a falha ocorre exclusivamente dentro da matriz do compósito, apresentando fibras de reforço remanescentes em ambas as superfícies.
- Falha de rompimento leve da fibra (LFT – “Light-fiber-tear failure”): a falha ocorre dentro do substrato, próximo à superfície, caracterizada por uma fina camada da matriz do compósito visível sobre o adesivo.
- Falha na haste do aderente (SB – “stock break failure”): Ocorre quebra do compósito fora região colada.
- Falha mista (“mixed failure”): qualquer combinação de duas ou mais das seis classes de modos de falha definidas anteriormente.

A FIG. 23 ilustra as definições acima:

Segundo Banea e Silva (2009), muitos estudos foram e ainda continuam sendo desenvolvidos com o intuito de prever as possíveis falhas em juntas coladas de materiais compósitos. No entanto, trata-se de uma tarefa ainda difícil, principalmente pelo fato das propriedades das juntas variarem de acordo com os parâmetros utilizados durante o processo de colagem.

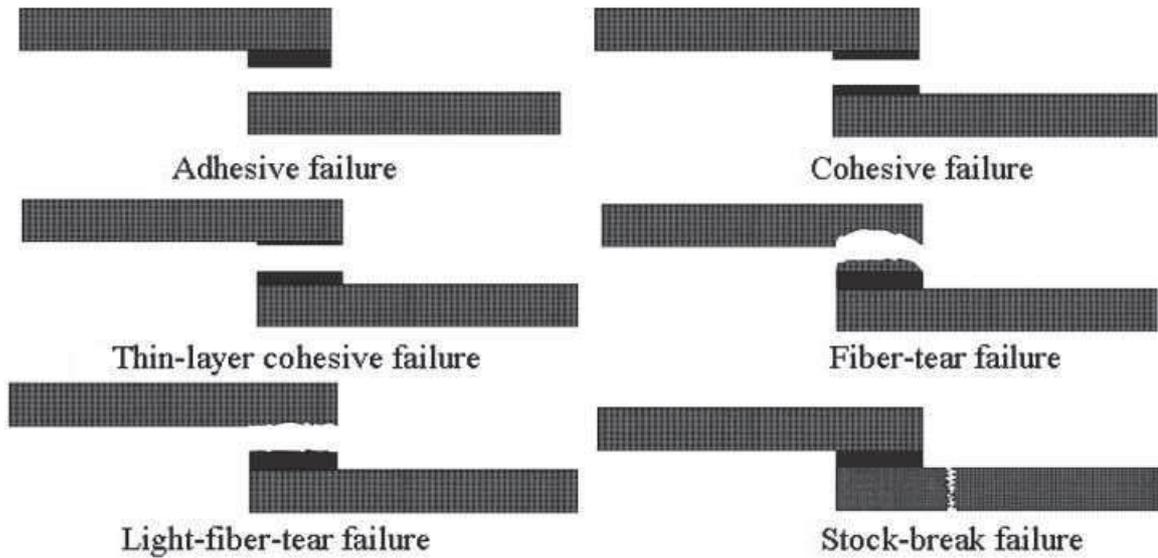


Figura 23: Modos de falha para juntas de materiais compósitos

Fonte: Adaptado de Banea e Silva (2009)

### 3.3.6 Análise de Tensões

De acordo com Bueno (2002), uma junta colada pode estar submetida a cinco tipos de tensões (veja a FIG. 24): compressão pura, cisalhamento puro, tração pura, clivagem, delaminação (“peel”). Estes tipos de tensões podem ocorrer separadamente ou de forma combinada.

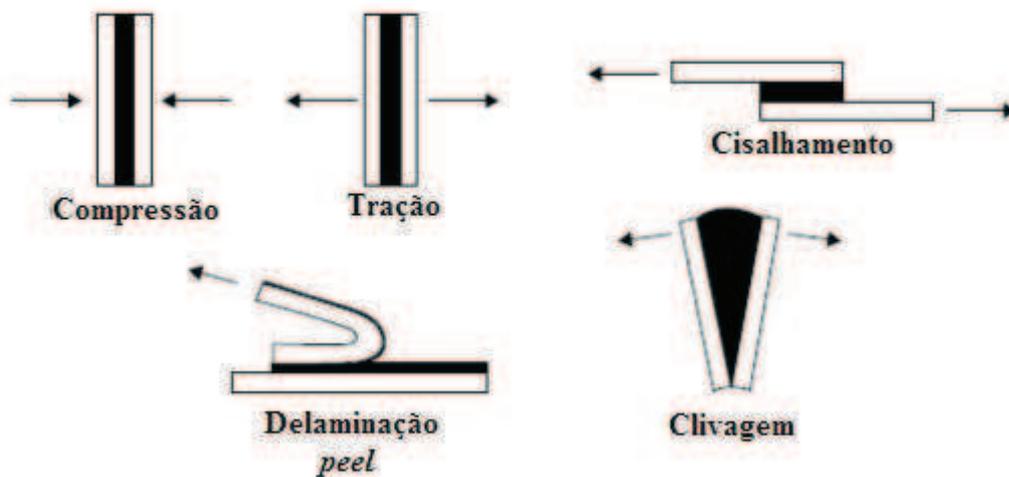


Figura 24: Tipos de Tensões em juntas single-lap

Fonte: Adaptado de Neto (2011)

Neto (2011) e Bueno (2002) diferenciam estes tipos de tensões da seguinte forma:

- **Compressão:** uma junta unida por adesivo submetida a um esforço de compressão será provavelmente a última a falhar em comparação às outras juntas submetidas a tipos de esforços diferentes. Infelizmente, esforços semelhantes a este raramente ocorrem na prática.
- **Tração:** sobre tração pura, teoricamente, as tensões na superfície do aderente e do adesivo são uniformemente distribuídas. Na realidade, deslocamentos na junta, flexão dos aderentes e outras complicações podem causar uma distribuição de tensões não linear, levando ao aparecimento de tensões de “peel” ou clivagem.
- **Cisalhamento:** é o tipo mais comum de esforço encontrado em juntas adesivamente coladas. Em cisalhamento puro, o esforço é paralelo ao plano da junta e tenta separar os elementos da junta pelo deslizamento de um deles sobre o outro. Com o cisalhamento puro, tem-se a vantagem de se impor uma tensão uniforme através de toda a área colada e, desse modo usar toda a junta para suportar o esforço aplicado. Sempre que possível a maioria do carregamento deve ser transmitido através da junta como um esforço de cisalhamento
- **“Peel”:** esforço responsável pela delaminação (“peel”). Situado fora do plano da junta, tenta abrir a mesma não uniformemente, frequentemente em uma de suas extremidades. Para este tipo de esforço ocorrer, um ou ambos os aderentes devem ser flexíveis e devem fletir. Quando isto ocorre um alto nível de tensão é desenvolvido localmente na interface adesivo-aderente o que gera a delaminação.
- **Clivagem:** similar a delaminação, exceto que as extremidades são forçadas de forma a separar o adesivo. A clivagem ocorre quando uma força de tração deslocada ou um momento é aplicado, causando uma distribuição de tensões não uniforme. Semelhante a delaminação, o esforço de clivagem deve também ser evitado quando possível.

A análise mais simples para a distribuição de tensões em uma junta tipo "single-lap" foi apresentada pela primeira vez em 1938 por Volkersen. A análise de Volkersen considera que os aderentes estão submetidos somente a carregamento de tração e o adesivo sofre apenas esforços cisalhantes, ambos constantes através da espessura (Veja FIG. 25) (BANEJA; SILVA, 2009). No entanto, a solução proposta por Volkersen não leva em consideração a não colinearidade das forças aplicadas sobre os aderentes. Como consequência seu estudo negligencia o momento resultante aplicado em adição às tensões no plano, bem como a flexão dos aderentes que permitem a rotação da junta. Além disso, sua análise conduz a um valor de tensão cisalhante máximo nas extremidades, onde por estarem livres, deveriam ser nulas (NETO, 2011).

Segundo Bueno (2002), a característica mais crítica de uma junta “single-lap” é a excentricidade no caminho da carga, a qual resulta em grandes deflexões do aderentes externos e da sobreposição, além de um momento na extremidade sobreposta. Goland e Reissner levaram em consideração

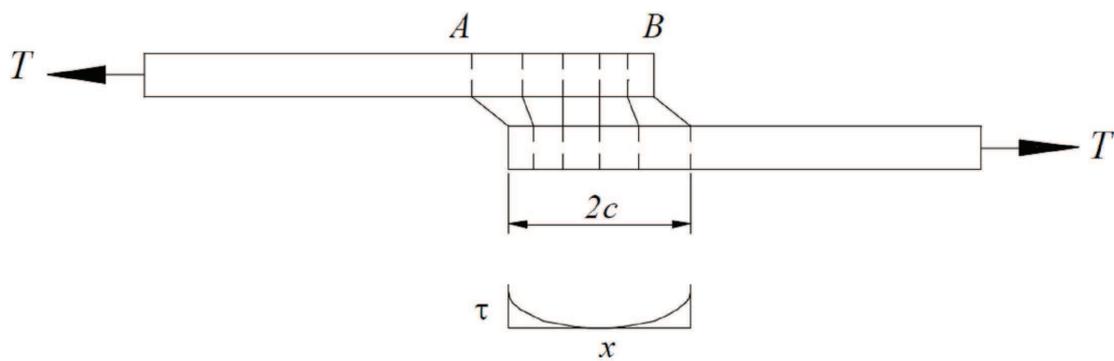


Figura 25: Junta considerada por Volkersen

Fonte: Adaptado de Neto (2011)

os efeitos de flexão dos aderentes, avaliando as tensões normais e cisalhantes na camada adesiva e nas regiões coladas dos aderentes, assumindo constantes através da espessura as tensões de delaminação e cisalhante. No entanto, consideraram que as partes sobrepostas formam um único corpo, como mostrado na FIG. 26, o que pode afastar muito os resultados da realidade. A típica distribuição das tensões cisalhantes e de “peel” obtidas através do modelo de Goland e Reissner, para um aderente de alumínio e um adesivo epóxi é mostrada na FIG. 27.

Hart-Smith, em sua análise, levou em conta as deformações individuais do aderente superior e inferior, considerando os efeitos de grandes deflexões da parte não sobreposta do aderente, mas ignorando este efeito sobre a região sobreposta. Para Hart-Smith o adesivo não deve ser a ligação fraca. Então, se as tensões de delaminação são mais prováveis de ocorrer, elas devem ser aliviadas pela diminuição gradual dos aderentes (chanfro) ou pelo espessamento local da camada adesiva. Seu modelo, contudo, ainda é limitado para camadas adesivas relativamente finas e flexíveis, resultante da não consideração de grandes deflexões sobre o "overlap" (BUENO, 2002).

O grande avanço computacional das últimas décadas permitiu que o método de elementos finitos (MEF) ganhasse destaque em vários ramos da engenharia e da ciência. O MEF têm sido de grande ajuda na determinação das distribuições de tensões em juntas coladas, uma vez que praticamente qualquer geometria sob carregamento pode ser analisada. Vários estudos já foram e ainda vem sendo desenvolvidos utilizando diferentes tipos de adesivos e aderentes, baseados em análises lineares ou não lineares (BANEJA; SILVA, 2009).

Cognard et al. (2011) analisou a influencia de alguns parâmetros geométricos na concentração de tensão em juntas single-lap, utilizando simulação por elementos finitos sob regime elástico. Panigrahi e Pradhan (2007) determinou a distribuição tridimensional de tensões para a camada adesiva, para a interface adesivo/aderente e a propagação da falha em juntas "single-lap" através de MEF, em regime linear elástico (veja FIG. 28). Haghani et al. (2010), utilizando o método dos

elementos finitos, conduziu uma análise paramétrica da influência exercida pelo comprimento do tapering<sup>1</sup> e das propriedades dos aderentes e adesivos sobre a distribuição de tensões da junta. Park e Kim (2010) utilizou análise em elementos finitos para determinar a distribuição de tensão em juntas de compósitos submetidas a impactos de alta velocidade. Li et al. (2005) analisaram o comportamento ao modo-I de fratura em juntas adesivas de materiais compósitos, utilizando um modelo de elementos finitos baseado em elementos coesivos.

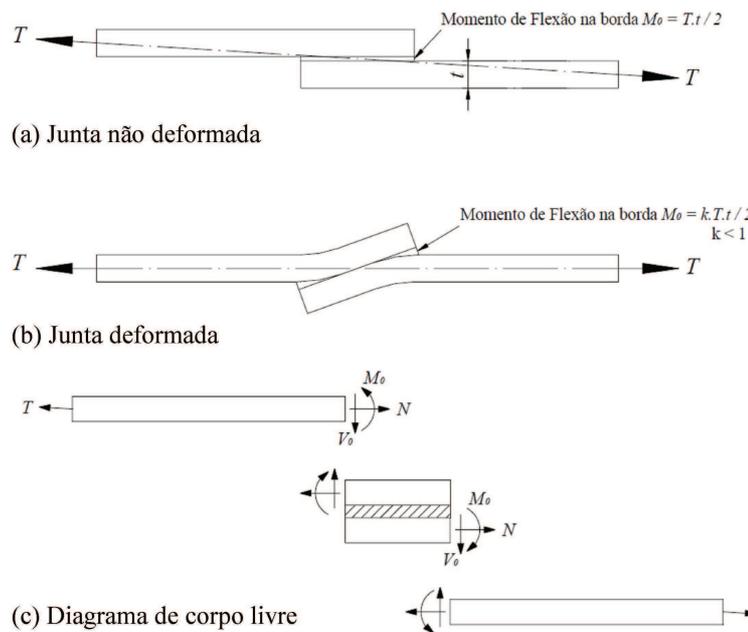


Figura 26: Junta "single-lap" considerada por Goland e Reissner

Fonte: Adaptado de Neto (2011)

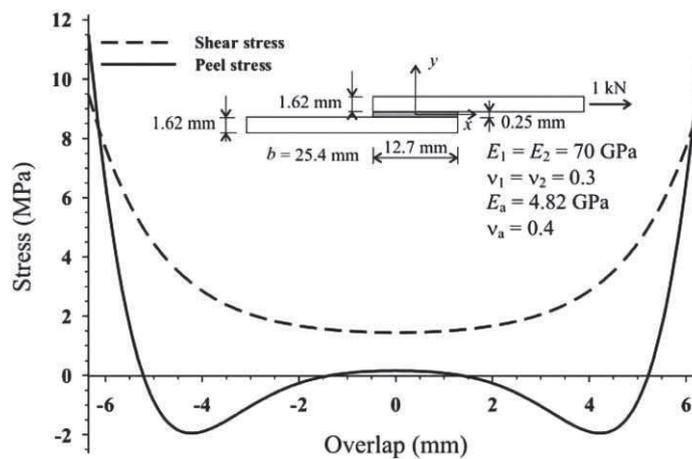


Figura 27: Distribuição de tensões em uma junta "single-lap" de acordo com a análise de Goland e Reissner

Fonte: Adaptado de Banea e Silva (2009)

<sup>1</sup> excesso de adesivo nas bordas da região de sobreposição resultante do processo de colagem

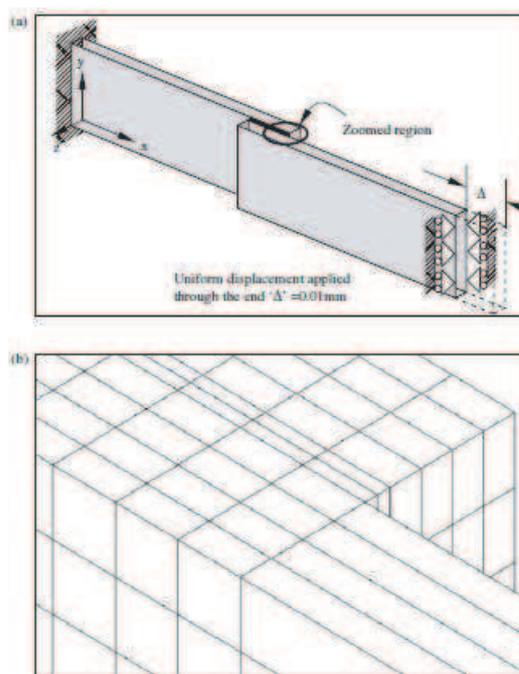


Figura 28: Junta single-lap com elementos finitos. (a) Modelo completo (b) Ampliação da região de overlap

Fonte: Adaptado de Panigrahi e Pradhan (2007)

A literatura mostra que existe espaço para melhoria do desempenho das juntas coladas; seja pela modificação do projeto da junta ou pela melhoria da "capacidade de carga" do adesivo.

### 3.3.7 Influência da espessura da camada adesiva

O efeito da espessura da camada adesiva sobre o desempenho de vários tipos de juntas vem sendo reportado por vários pesquisadores ao longo dos anos. No entanto, ainda há poucas informações a este respeito para juntas single-lap (KAHRAMAN, 2008). Segundo Grant et al. (2009) juntas single-lap sob tensão são muito sensíveis à espessura da camada adesiva. À medida que a camada adesiva aumenta, há um aumento no momento sob a região de sobreposição, devido excentricidade do carregamento. Consequentemente a resistência da junta diminui.

De acordo com os resultados apresentados por Tamblin et al. (2008) em seu estudo utilizando espessuras variando de 0,4 mm e 3 mm ele constatou uma diminuição nos valores da resistência aparente ao cisalhamento com o aumento da espessura do adesivo. Kahraman et al. (2008) investigou a influência da espessura do adesivo sobre as propriedades de juntas single-lap. Em seu estudo, a espessura da camada adesiva variou de 0,03 mm a 1,3 mm. Os resultados mostraram uma queda de 35 - 40% na resistência ao cisalhamento da junta, a medida que a espessura passou de 0,03 mm para 1,3 mm. Taib et al. (2006) analisou juntas em seção L com espessuras de adesivo variando de 0,127, 0,635 e 2,54 mm. Seus resultados mostraram uma diminuição na

carga de ruptura de 8,27 N para 3,9 N à medida que a espessura aumentou. Ele atribuiu estes resultados à uma mudança de um estado plano de tensões para um estado plano de deformações.

De um modo geral, a causa desta tendência à diminuição da resistência da junta à medida que a espessura da camada adesiva aumenta, pode ser de interpretação complexa devido a vários fatores que podem influenciar o comportamento da junta. Davies et al. (2009) cita cinco fatores principais que poderiam justificar este fenômeno:

- A natureza ou dimensão dos defeitos internos ao adesivo podem variar com a espessura da camada adesiva
- A estrutura do adesivo pode mudar à medida que camada adesiva aumenta. Isto poderia ser causada, por exemplo, pela diferença nas condições de cura.
- As propriedades da interface adesivo/aderente podem alterar pela modificação da espessura devido a alterações nas tensões na região de interface.
- O mecanismo de dissipação de energia (plasticidade, propagação de dano, etc.) pode se modificar pela mudança na distância entre os aderentes.
- A mudança na geometria da junta devido o aumento da espessura da camada adesiva pode mudar o estado de tensões no interior da junta, fazendo com que espécimes com diferentes espessuras não apresentem as mesmas propriedades.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Materiais e equipamentos

Para confecção dos aderentes foi utilizado um sistema de resina epóxi tipo bisfenol A com endurecedor de amina e tecido plano de fibra de vidro de  $300 \text{ g/m}^2$ . O sistema epóxi foi fornecida pela Huntsman sob os nomes comerciais de RenLam M e HY956 (resina e endurecedor, respectivamente). A proporção da mistura é de 100 partes de resina para 20 partes de endurecedor (proporções calculadas em relação à massa) e o tempo de gel é de 30 minutos a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . A cura foi feita em 24 horas à temperatura ambiente e a pós-cura em 6 horas à  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ . De acordo com o fabricante, a resina final tem densidade de  $1,1 \text{ g/cm}^3$ . O tecido de fibra de vidro, tipo E-glass, foi fornecido pela Texiglass, possuindo a mesma quantidade de fios nas duas direções.

Como adesivo foi utilizado o sistema epóxi AR300-AH30/150, fornecido pela Barracuda Advanced Composites. O endurecedor é constituído de 90% de AH-30 e 10% de AH-150, fornecendo um tempo de gel de aproximadamente 60 minutos a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . A proporção resina/endurecedor utilizada foi de 100:33 partes, tendo uma viscosidade aproximada entre 0,8 e 0,9 Pa.s. O processo de cura foi realizado à temperatura ambiente seguido de pós-cura a  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  por 6 horas.

As amostras de MWCNT, crescidos por CVD, foram fornecidas pelo Departamento de Física da Universidade Federal de Minas Gerais. Duas balanças eletrônicas foram utilizadas para pesagem das nanopartículas e da resina, ambas fornecidas pela Ohaus. O modelo ARA520 com capacidade de 1500g e incremento de 0,01g foi utilizado na pesagem das resinas e o modelo AR3130 com capacidade de 310g e incremento de 0,001g para a pesagem das nanoestruturas.

Para a dispersão das nano partículas foi usada uma lavadora ultrassônica digital marca Kondortech, modelo CD-4820 com frequência operacional de 42 kHz (FIG. 29). A estufa utilizada para a realização da pós-cura possui 1100 kW de potencia e temperatura máxima de  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , fabricada pela Fornos Magnu's (FIG. 30).



Figura 29: Lavadora ultrassônica digital Kondortech, modelo CD-4820



Figura 30: Estufa Fornos Magnu's

Para o corte dos aderentes e tabs foi utilizada uma micro retifica Dremel 4000 com 175 W de potencia

A colagem dos CP's foi realizada com o auxílio de um dispositivo guia desenvolvido no próprio laboratório de compósitos (FIG. 31) e a carga sobre a região de superposição das juntas foi aplicada através de uma prensa hidráulica PHI, modelo QR-240C (FIG. 32).



Figura 31: Dispositivo guia para colagem de juntas



Figura 32: Prensa hidráulica PHI, modelo QR-240C

Para controlar a espessura da camada adesiva calços de teflon com espessura aproximada de 0,13 mm foram utilizados.

Os ensaios de tração e resistência aparente ao cisalhamento por tração foram realizados em uma máquina de ensaios universal modelo 10000, linha DL, fabricada pela EMIC (FIG. 33). A máquina de ensaios em questão possui carga máxima de até 100KN e estava equipada com célula de carga de mesma capacidade.



Figura 33: Máquina de ensaios universal EMIC

Para realizar a análise estatística dos dados utilizou-se a versão 9.0 do software OriginPro para verificar se as variações medidas foram estatisticamente significativas ou não, realizou-se a análise de variância ANOVA com nível de significância  $\alpha = 0,05$ . Utilizou-se o teste de Tukey para realizar as comparações entre as médias.

## 4.2 Procedimentos

### 4.2.1 Aderentes e Tabs

Os aderentes de fibra de vidro foram confeccionados adotando a relação 60% de fibra e 40% de resina. Sobre uma placa de vidro temperado foram espalhadas 3 camadas de desmoldante, com o intuito de diminuir a aderência entre a resina e o vidro. Uma tira de tecido de poliéster foi utilizada como peel-ply, a fim de garantir uma superfície rugosidade superficial no laminado,

garantindo uma boa superfície de colagem, tanto para as juntas quanto para os tabs. Com o auxílio de uma espátula de plástico espalhou-se uma quantidade uniforme de resina epóxi. Uma camada de fibra de vidro foi então posicionada sobre a camada de poliéster e compactada com um rolo metálico para a retirada de possíveis bolhas de ar. Mais uma camada de resina foi depositada de maneira uniforme sobre a fibra de vidro, e de forma semelhante as demais camadas de fibras e resinas foram posicionadas e trabalhadas. Após a última camada de fibra de vidro, mais uma camada de poliéster foi posicionada e compactada. A cura foi realizada conforme parâmetros descritos anteriormente. As placas de compósitos foram confeccionadas em 250 mm x 250 mm, sendo todas constituídas de 9 camadas de fibras, conferindo uma espessura de aproximadamente 2,37 mm ao laminado. Para a obtenção das dimensões finais dos aderentes e tabs, estes foram cortados com auxílio de uma minirretífica elétrica e lixados a seco com o uso de lixas de granulação 50 e 300.

#### 4.2.2 Dispersão das nanoestruturas e colagem das juntas

As proporções em peso dos nanotubos de carbonos em relação ao adesivo foram definidas como 0%, 0,5%, 1,0%, 2,0%, a Tabela 4 relaciona os grupos de teste desenvolvidos. Para dispersão dos MWCNT, os mesmos foram misturados em suas respectivas concentrações à resina e a mistura levada ao banho de ultrassom por 80 min. Os aderentes foram então lixados com lixa de granulação 200 (apenas na região de sobreposição), para aumentar a rugosidade superficial e limpos com acetona. O endurecedor foi misturado a solução resina e MWCNT e esta aplicada nos aderentes com o auxílio de uma espátula de madeira. Os Cp's foram colados utilizando o molde metálico desenvolvido no laboratório de compósitos. Calços de teflon foram dispostos de acordo com a necessidade sobre molde para auxiliar no controle da espessura da camada adesiva. A fim de garantir uma pressão uniforme sobre a região de superposição o dispositivo foi levado a prensa sob carga aproximada de 500kg. A cura do adesivo se deu por 24h a temperatura ambiente e a pós-cura foi realizada por 6 horas a 80 °C.

Tabela 4: Conjuntos de Teste

Concentração de Nanopartículas	Espessura da camada adesiva (mm)
0% CNT	0,05
	0,15
	0,4
0,5% CNT	0,05
	0,15
	0,4
1% CNT	0,05
	0,15
	0,4
2 % CNT	0,05
	0,15
	0,4

### 4.2.3 Testes Mecânicos

Os testes foram realizados de acordo com as especificações da Norma D5868 em uma máquina de tração universal. As dimensões dos CP's empregados nos testes mecânicos encontram-se na figura 34. A velocidade de deslocamento do cabeçote foi programada em 13 mm/min. A celular de carga possui capacidade máxima de 10000 *kgf* e o deslocamento medido foi o do cabeçote. Os dados obtidos foram exportados para outro software para a realização de cálculos, geração dos gráficos e análise de dados.

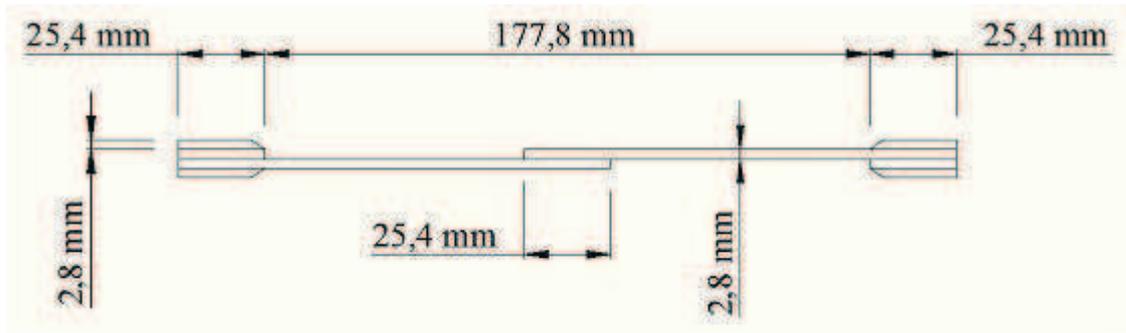


Figura 34: Dimensões do corpo de prova

Fonte: Adaptado de (NETO, 2011)

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento aparente por tração pode ser dividida em dois aspectos: influência da espessura da camada adesiva e a influência da adição de nanotubos sobre o comportamento da junta (rigidez, capacidade de carga e modos de falha). Primeiramente será analisada a influência da espessura da camada adesiva e em seguida como a adição de nanotubos modificou o comportamento das juntas.

### 5.1 Influencia da espessura da camada adesiva

#### 5.1.1 AR300 sem adição de nanotubos de carbono

##### 5.1.1.1 Espessura fina - 0,05 mm (A00-005)

A espessura média da camada de adesivo obtida para cada corpo de prova ensaiado se encontra na tabela 5 abaixo. Estes valores foram medidos através de imagens feitas das laterais das juntas anteriormente ao ensaio e processadas através de software.

Tabela 5: Espessura média dos CP's do grupo A00-005

CP	Espessura Média (mm)	Desvio Padrão (mm)
1	0,05122	0,00815
2	0,05251	0,01131
3	0,05463	0,01096
4	0,05242	0,00994
5	0,0553	0,01150
6	0,05971	0,00927
7	0,05290	0,01016
8	0,05438	0,01086

A tabela 6 e a FIG.35 mostram, respectivamente, os resultados e as curvas características obtidas através dos ensaios. A FIG.36 apresenta as regiões de falha, onde pode-se observar a presença de falhas mistas (LFT e coesiva). A relação área de falha coesiva e área total foram medidas também através de imagem e se encontra expressas entre parêntese na coluna modo de falha. Este grupo foi o único constituído de adesivo puro a apresentar falha mista, muito provavelmente decorrente de uma redistribuição de tensões (adesivo em estado triplo de tensões) propiciada pela espessura muito fina do filme adesivo.

Tabela 6: Resultados dos ensaios de tração - AR00-005

CP	Força Máxima (N)	Tensão Máxima (Mpa)	Desloc. Max. (mm)	Modo de Falha
1	6247,61	10,11	3,018	Falha mista: LFT e coesiva (34,56%)
2	6244,39	10,16	2,848	Falha mista: LFT e coesiva (18,61%)
3	7149,8	11,52	3,176	Falha mista: LFT e coesiva (58,14%)
4	6157,4	9,9	2,665	Falha mista: LFT e coesiva (11,13%)
5	6663,26	10,71	2,986	Falha mista: LFT e coesiva (26,99%)
6	7539,67	11,98	3,135	Falha mista: LFT e coesiva (40,29%)
8	8129,31	13,07	3,359	Falha mista: LFT e coesiva (53,97%)

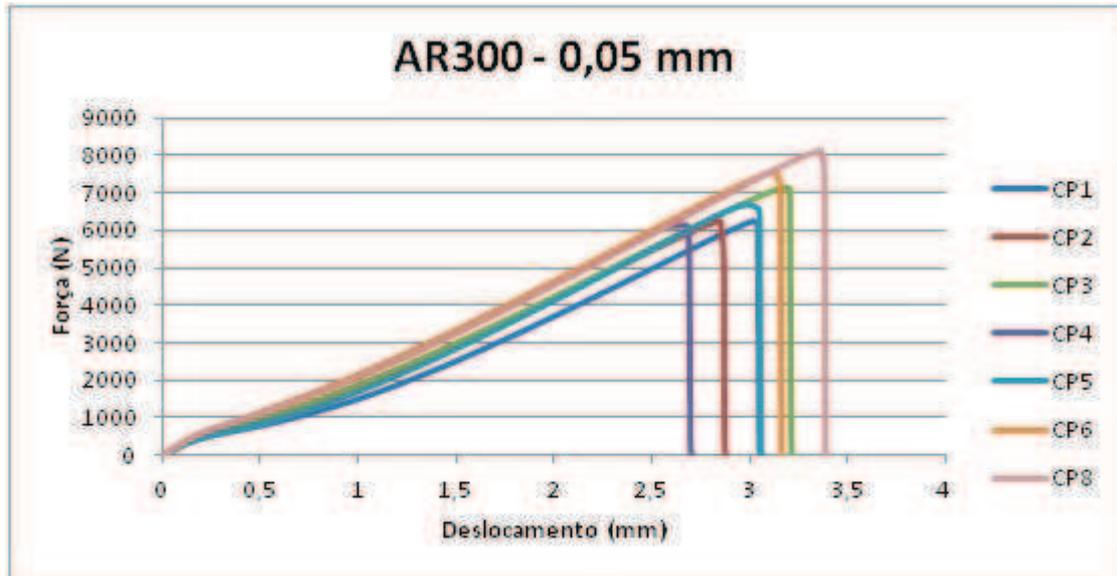


Figura 35: Curva Força x Deslocamento - Grupo A00-005

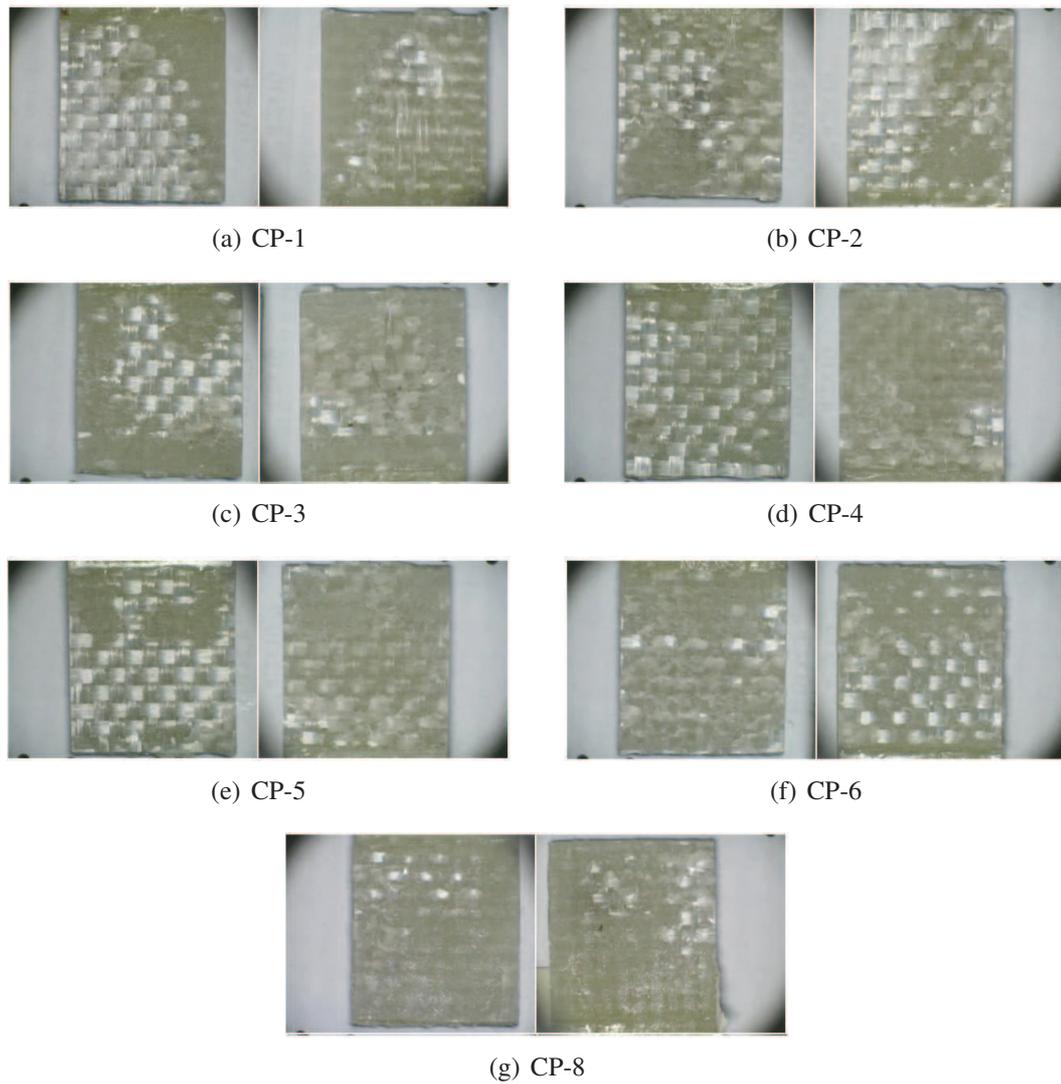


Figura 36: Regiões de falha - Grupo A00-005

#### 5.1.1.2 Espessura média 0,15 mm (A00-015)

As tabelas 7 e 8 mostram, respectivamente, a espessura média da camada de adesivo obtida e os resultados obtidos para cada corpo de prova ensaiado.

Tabela 7: Espessura da camada adesiva- AR00-015

CP	Espessura Média (mm)	Desvio (m)
1	0,15570	0,01962
2	0,15795	0,018027
3	0,14641	0,01917
4	0,15558	0,02520
5	0,14557	0,02008
6	0,15257	0,02385
7	0,150599	0,0208
8	0,15964	0,01774

Tabela 8: Resultados dos ensaios de tração - AR00-015

CP	Força Maxima (N)	Tensão Máxima (Mpa)	Desloc. Max. (mm)	Modo de Falha
1	6927,47	11,08	2,852	LFT
2	6817,92	10,91	2,76	LFT
3	7842,54	12,55	3,089	LFT
4				
5	7040,25	11,26	2,573	LFT
6	6573,04	10,52	2,902	LFT
7	6930,7	11,09	2,82	LFT
8	6231,5	9,97	2,501	LFT

A figura 37 apresenta as curvas Força x deslocamento obtidas durante o ensaio

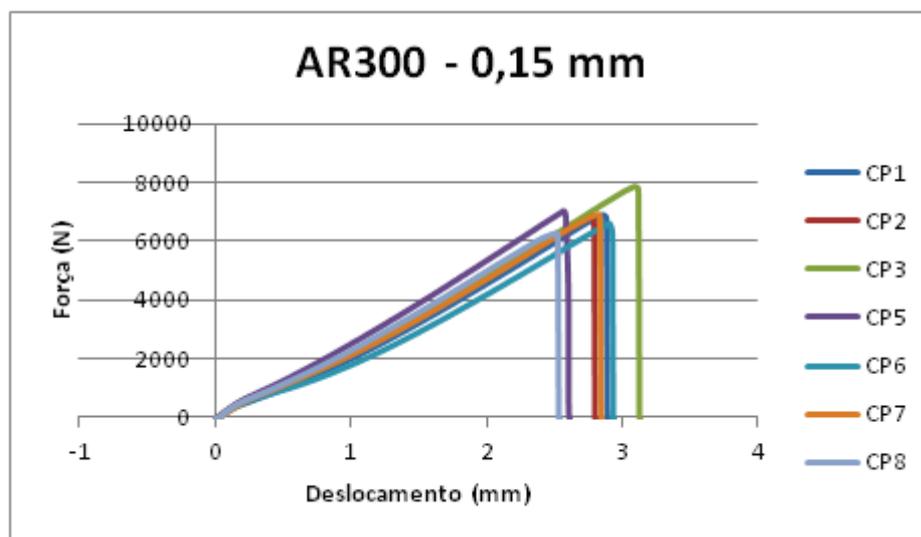


Figura 37: Curva Força x Deslocamento - Grupo A00-015

As regiões de falha estão representadas pelas FIG.37, onde pode se notar uma presença de um modo único de falha o LFT - "*light fiber tear*" ou arrancamento leve da primeira camada. É evidente a presença de filamentos de fibra de vidro aderidos na superfície do adesivo, fenômeno este que pode estar associado a uma mudança no gradiente de tensão devido a um aumento da espessura.

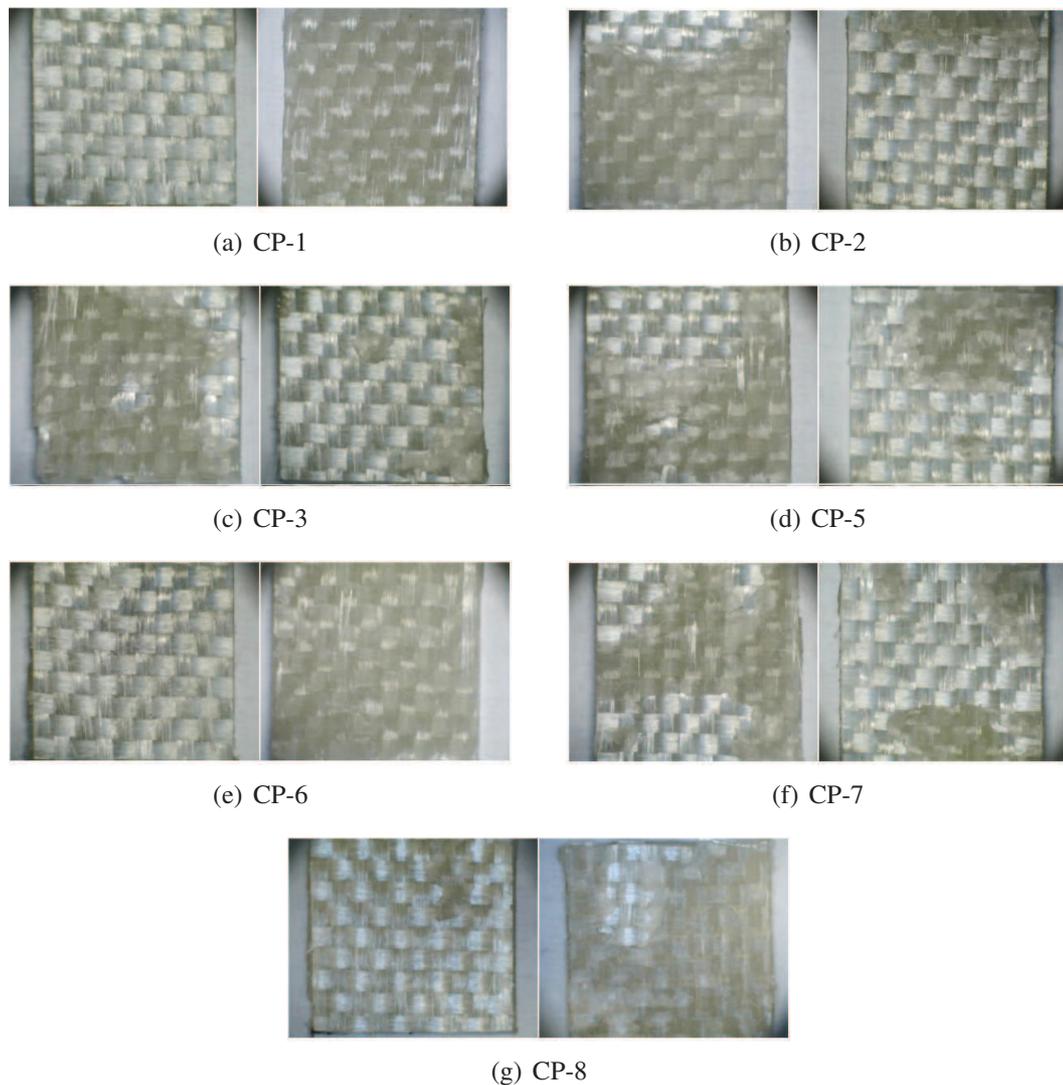


Figura 38: Regiões de falha - Grupo A00-015

### 5.1.1.3 Espessura maior 0,40 mm (A00-040)

A tabela 9 mostra os valores obtidos através da medição de espessura dos corpos de prova. Observando os valores médios, pode-se constatar que são menores que o esperado, isso deve-se principalmente ao desalinhamento das juntas durante processo de colagem. A FIG.39 exemplifica o perfil da camada adesivo observado. Este efeito é decorrente principalmente da baixa viscosidade do adesivo utilizado, que torna difícil a sua utilização para espessuras maiores.

Tabela 9: Espessura da camada adesiva- AR00-040

CP	Espessura Média (mm)	Desvio (mm)
1	0,20837	0,04790
2	0,25233	0,06288
3	0,22896	0,04772
4	0,20780	0,06866
5	0,18683	0,05777
6	0,23423	0,06010
7	0,248255	0,064134
8	0,21614	0,05978

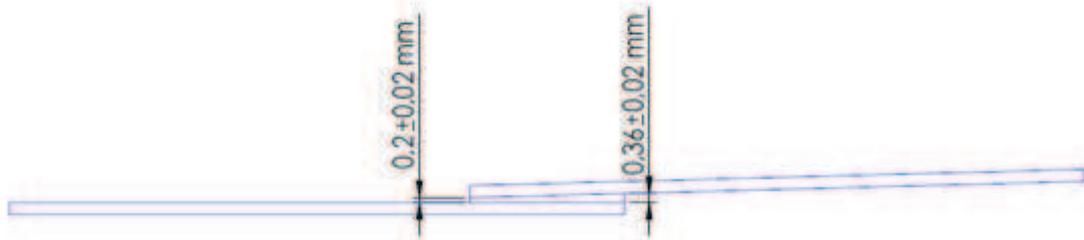


Figura 39: Perfil do filme de adesivo - Grupo A00-040

A tabela 10 e a FIG.40 apresentam os resultados obtidos durante o ensaio de cisalhamento aparente. Ao observar as curvas força x deslocamento, pode-se notar uma variação significativa na rigidez das juntas, o que pode ser resultante da variação da espessura do adesivo. O perfil não paralelo do adesivo teve ao que tudo indica influência não só na rigidez, mas também na carga de ruptura e deslocamento máximo na falha. Este aumento na capacidade de carga pode estar associado a dois fatores principais: ao gradiente de tensões que varia simultaneamente nas direções longitudinal e transversal e/ou ao aumento do deslocamento do adesivo (resultante de uma "acomodação" da variação da espessura) o que torna necessária uma maior quantidade de energia para levar à ruptura da junta.

Tabela 10: Resultados dos ensaios de tração - AR00-040

CP	Força Maxima (N)	Tensão Máxima (Mpa)	Desloc. Max. (mm)	Modo de Falha
1	7987,54	12,74	3,764	LFT
2	7961,76	12,84	4,095	LFT
3	7826,43	12,67	3,384	LFT
4	8361,3	13,52	4,003	LFT
5	6937,14	10,95	4,282	LFT
6	8187,31	12,93	4,447	LFT
7	8151,86	13,06	3,476	LFT
8	6882,36	11,18	2,957	LFT

Observando as regiões de falha (FIG.41) é possível notar falhas unicamente formadas pelo descolamento da primeira camada (LFT), muito similares aos observados no grupo A00-015.

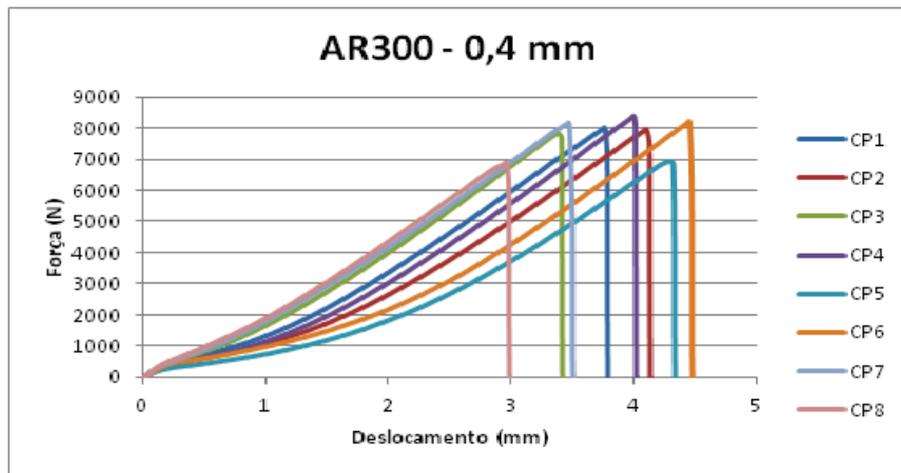


Figura 40: Curva Força x Deslocamento - Grupo A00-040

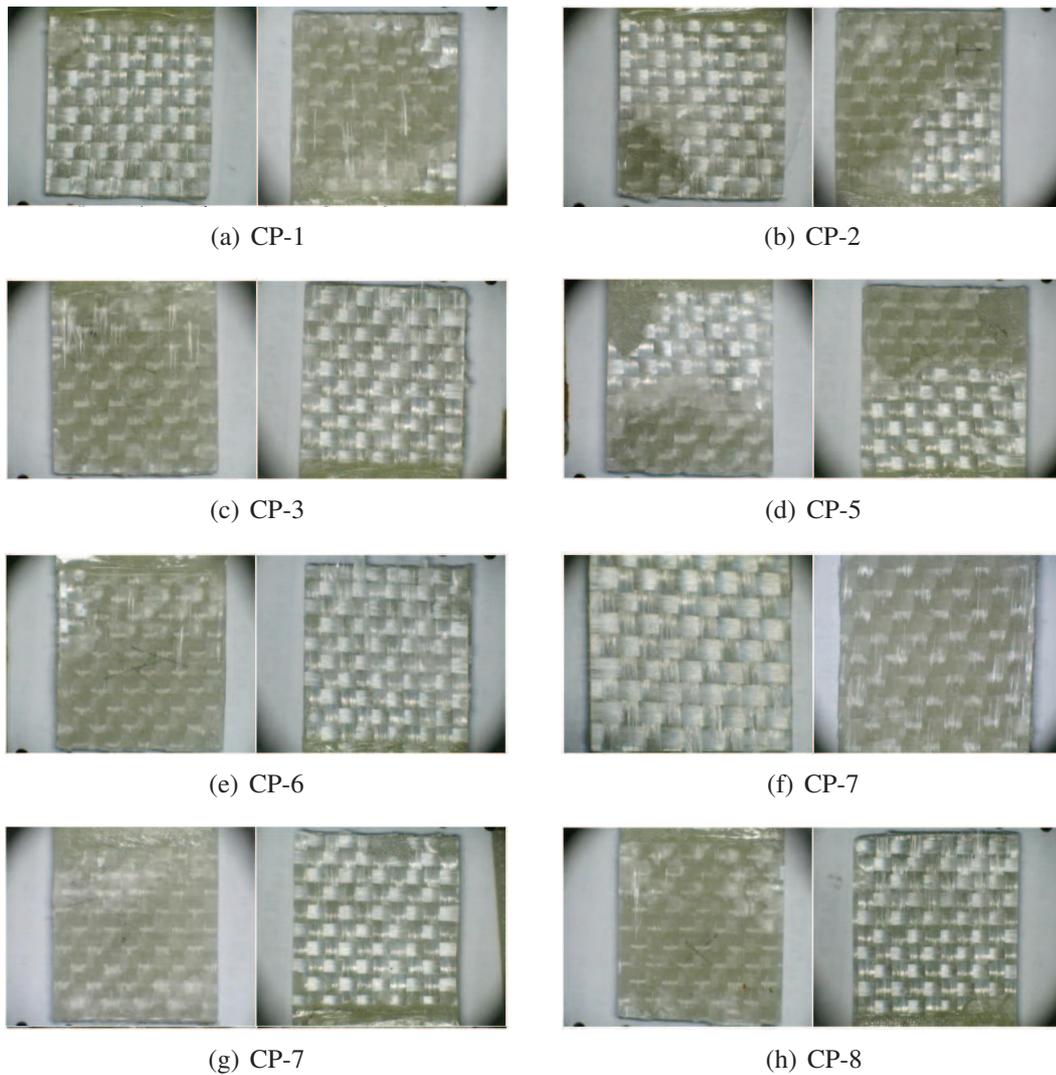


Figura 41: Regiões de falha - Grupo A00-040

#### 5.1.1.4 Visão geral do grupo

As FIG.42-44 apresentam a distribuição estatística, respectivamente, da tensão máxima na falha, deslocamento máximo na falha e rigidez. Segundo análise de ANOVA realizada a 0,05 de significância não foi observada diferença estatisticamente significativa nos valores de rigidez para os três grupos. As maiores tensões e deslocamentos máximos na falha foram observados no grupo A00-040. A presença de um perfil não paralelo da camada adesiva, ao que tudo indica pode ser o principal responsável por este comportamento.

A migração de uma falha mista presente no grupo A00-005 para uma falha puramente LFT nos grupos A00-015 e A00-040 parece estar associada ao aumento da espessura do filme adesivo e a consequente alteração nos gradientes de tensão dentro da camada adesiva.

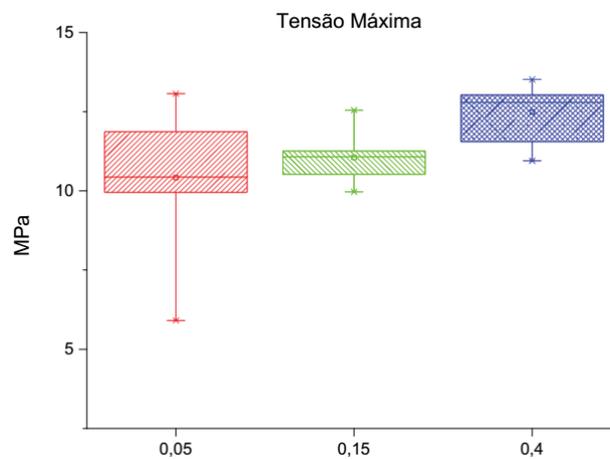


Figura 42: Tensão máxima na ruptura - A00-xxx

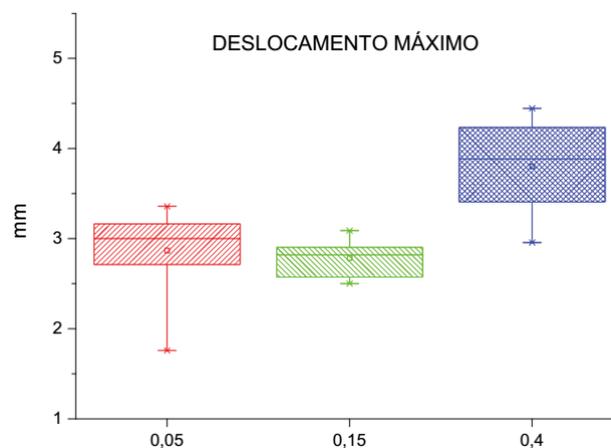


Figura 43: Deslocamento máximo na ruptura - A00-xxx

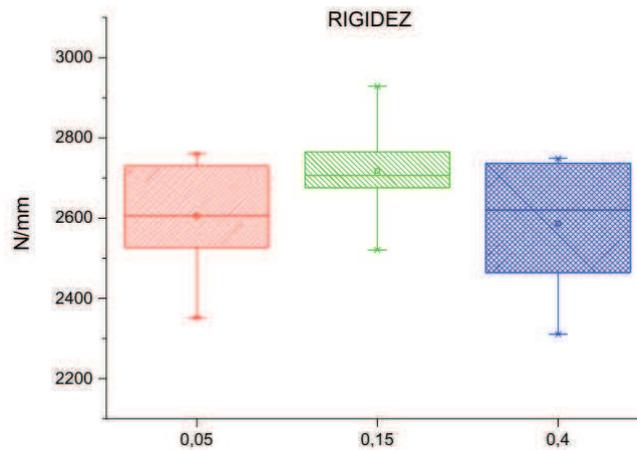


Figura 44: Rigidez Intrínseca - A00-xxx

### 5.1.2 AR300 + 0,5% MWCNT

#### 5.1.2.1 Espessura fina - 0,05 mm (A05-005)

A tabela 11 lista os valores da espessura da camada de adesivo encontrada para os corpos de prova do grupo A05-005. Pode-se observar que a variação da espessura se encontra dentro de valores aceitáveis, com desvio padrão relativamente baixo.

Tabela 11: Espessura da camada adesiva - AR05-005

CP	Espessura Média (mm)	Desvio (m)
1	0,05722	0,00826
2	0,05852	0,01142
3	0,06064	0,01106
4	0,05842	0,01004
5	0,0613	0,01160
6	0,06571	0,00937
7	0,06571	0,00937

Os resultados obtidos nos ensaios de tração se encontram expressos na tabela 12 e FIG.45. As curvas força x deslocamento mostram um comportamento praticamente idêntico, apresentando a mesma rigidez para todos os CP's.

Tabela 12: Resultados dos ensaios de tração - AR05-005

CP	Força Máxima (N)	Tensão Máxima (Mpa)	Desloc. Max. (mm)	Modo de Falha
1	7049,91	11,28	2,96	LFT
2	6946,81	11,11	3,042	LFT
3	7198,13	11,52	2,996	LFT
4	7272,24	11,64	3,092	LFT (mais leve)
5	7236,79	11,58	2,931	LFT (mais leve)
6	6988,69	11,18	2,824	LFT (mais leve)
7	7043,47	11,27	3,126	LFT

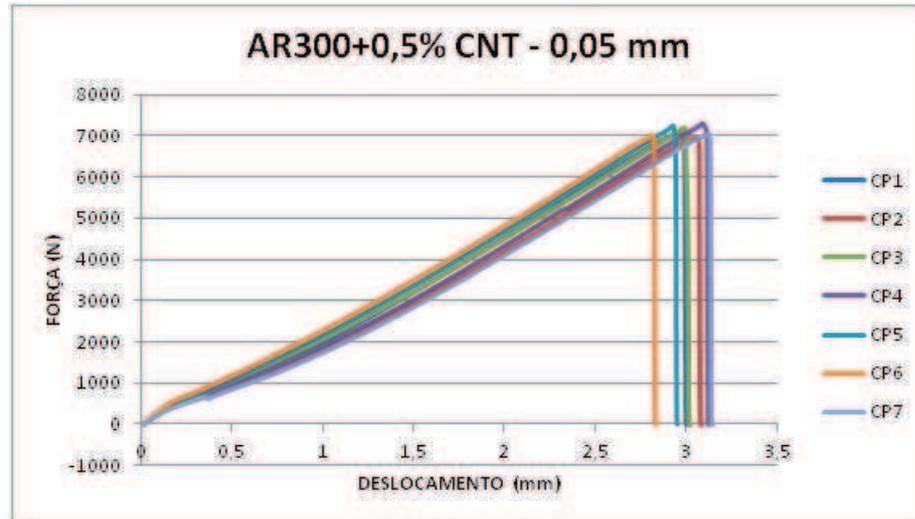


Figura 45: Curva Força x Deslocamento - Grupo A05-005

Observando a FIG.46 é possível detectar o modo de falha LFT em todos os casos. No entanto, para os casos CP4, CP5,CP6, uma análise mais detalhada mostra um grau de intensidade de falha diferente. A não existência de falha coesiva para a espessura de 0,05 mm pode ser atribuída à dispersão do nanotubo. Este pode ter interagido com as cadeias poliméricas criando uma barreira mecânica reduzindo a nucleação e propagação de trincas. Além disso, os MWCNT podem ter propiciado melhor adesão superficial entre adesivo e aderente, criando uma interface mais resistente. A presença de concentrações de aglomerados de nanotubos (pontos escuros) no adesivo gerando concentradores de tensão, pode ser uma das causas para a maior fragmentação do adesivo observada nos CP4, CP5, CP6. A distribuição espacial destes aglomerados ao longo da junta pode ser uma das causas para a maior ou menor fragmentação do adesivo observadas na região de falha.

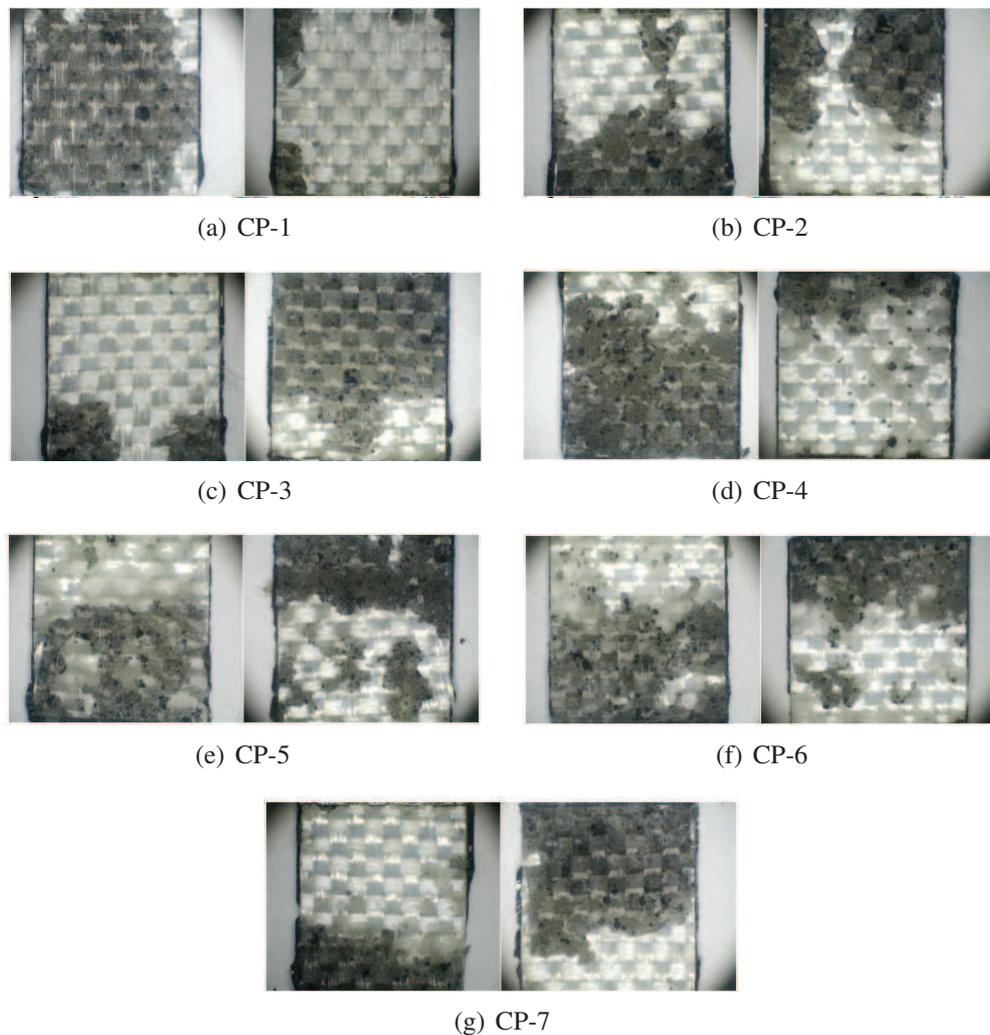


Figura 46: Regiões de falha - Grupo A05-005

#### 5.1.2.2 Espessura média - 0,15 mm (A05-015)

Os valores de espessura encontrados para os CP's do grupo A05-015 (FIG. 13), mostram uma variação aceitável para o processo de colagem empregado.

Tabela 13: Espessura da camada adesiva - AR05-015

CP	Espessura Média (mm)	Desvio (mm)
1	0,16260	0,02162
2	0,16255	0,02003
3	0,15101	0,02117
4	0,16018	0,02720
5	0,15017	0,02208
6	0,15717	0,02385
7	0,15519	0,0228

Observando as curvas força x deslocamento (FIG.47) e os resultados de tensão e deslocamentos (tabela 14) pode-se ver uma variação significativa na rigidez e deslocamentos máximos dos

corpos de prova, assim como uma diminuição nos valores de tensão se comparados com o grupo A05-005 . Este comportamento poderia ser explicado tanto pelo aumento da espessura da camada adesiva, gerando assim uma alteração no gradiente de tensões, quanto pelas regiões de falha observadas na FIG.48. Para o grupo A05-015 pode-se observar uma grande quantidade de aglomerados mal distribuídos pela região da junta, o que pode ter provavelmente gerado uma distribuição não uniforme de tensões

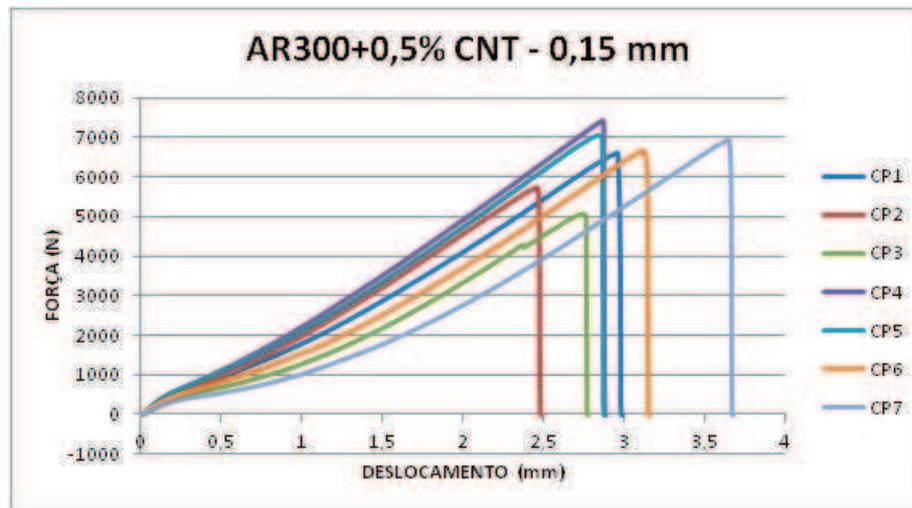


Figura 47: Curva Força x Deslocamento - Grupo A05-015

Tabela 14: Resultados dos ensaios de tração - AR05-015

CP	Força Máxima (N)	Tensão Máxima (Mpa)	Desloc. Max. (mm)	Modo de Falha
1	6582,71	10,53	2,962	LFT
2	5725,64	9,16	2,468	LFT
3	5065,11	8,1	2,753	LFT
4	7388,23	11,82	2,873	LFT
5	7049,91	11,28	2,845	LFT
6	6621,38	10,59	3,133	LFT
7	6908,14	11,05	3,653	LFT

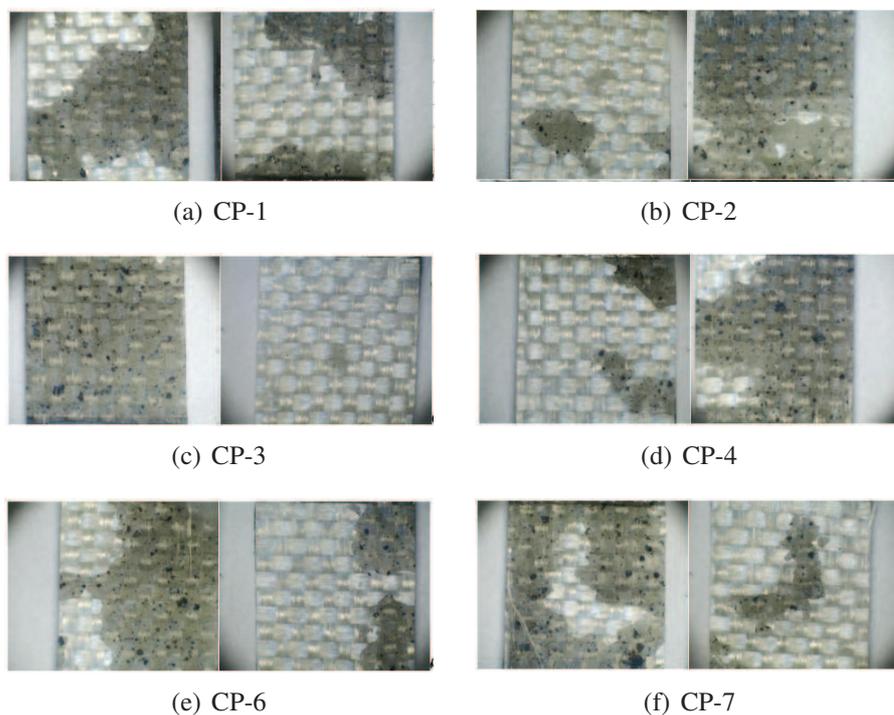


Figura 48: Regiões de falha - Grupo A05-015

### 5.1.2.3 Espessura maior - 0,40 mm (A05-040)

A camada adesiva do grupo A05-040 apresenta uma variação de espessura um pouco superior aos casos anteriores, conforme mostrado na tabela 15.

Tabela 15: Espessura média da camada adesiva - AR05-040

CP	Espessura Média (mm)	Desvio (mm)
1	0,32837	0,07780
2	0,37233	0,09286
3	0,34896	0,07760
4	0,32780	0,09868
5	0,30683	0,08777
6	0,27423	0,09010

Observando as curvas força x deformação (FIG.49) podemos destacar dois comportamentos destoantes CP4 e CP6. A variação abrupta de força apresentada e pelo CP4 é resultante provavelmente do descolamento de um dos tabs de alinhamento durante o ensaio de tração. A grande variação de deslocamento e força e consequentemente rigidez apresentada pelo CP6 pode ser resultado de uma variação bidimensional do gradiente de tensões (transversal e longitudinalmente) decorrente de um perfil não paralelo da camada adesiva muito similar àquele observado na FIG.39.

Analisando a FIG.16 e as regiões de falha apresentadas na FIG.50. Podemos observar um decréscimo na tensão máxima suportada pela junta e a presença de um modo de falha puramente do tipo

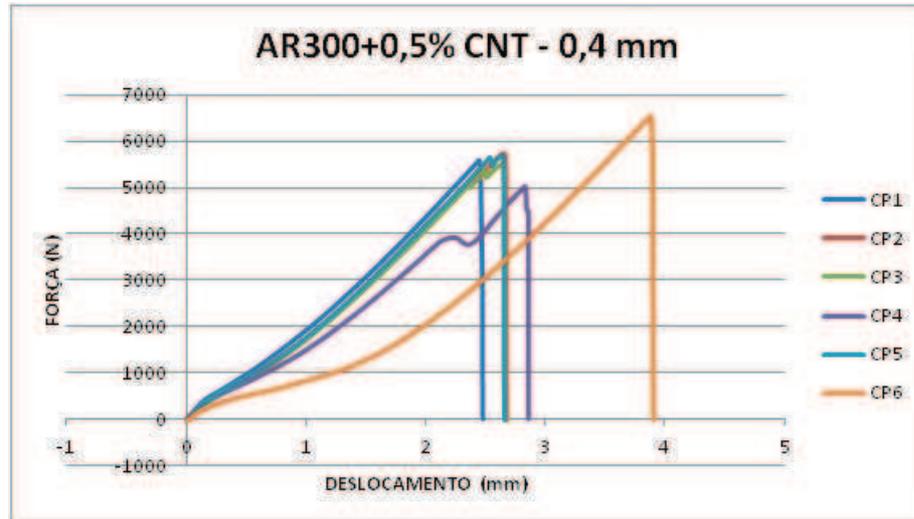


Figura 49: Curva Força x Deslocamento - Grupo A05-040

LFT. O arrancamento da primeira camada do compósito pode ser ocasionado pela boa dispersão dos MWCNT, observada nas regiões de falha (ausência de ponto de aglomeração visíveis), tornando a interface adesivo/aderente mais resistente ao cisalhamento. O decréscimo na tensão máxima por sua vez pode ter sido ocasionado pelo aumento da espessura da camada adesiva. Isso pode evidenciar a existência de dois mecanismos de falha que atuam simultaneamente, melhoria das propriedades internas decorrentes da adição de nanotubos e aumento da espessura.

Tabela 16: Resultados dos ensaios de tração - AR05-015

CP	Força Máxima (N)	Tensão Máxima (Mpa)	Desloc. Max. (mm)	Modo de Falha
1	5599,98	8,96	2,446	LFT
2	5722,42	9,16	2,66	LFT
3	5506,54	8,81	2,635	LFT
4	5007,11	8,01	2,828	LFT
5	5693,42	9,11	2,654	LFT
6	6518,27	10,43	3,888	LFT

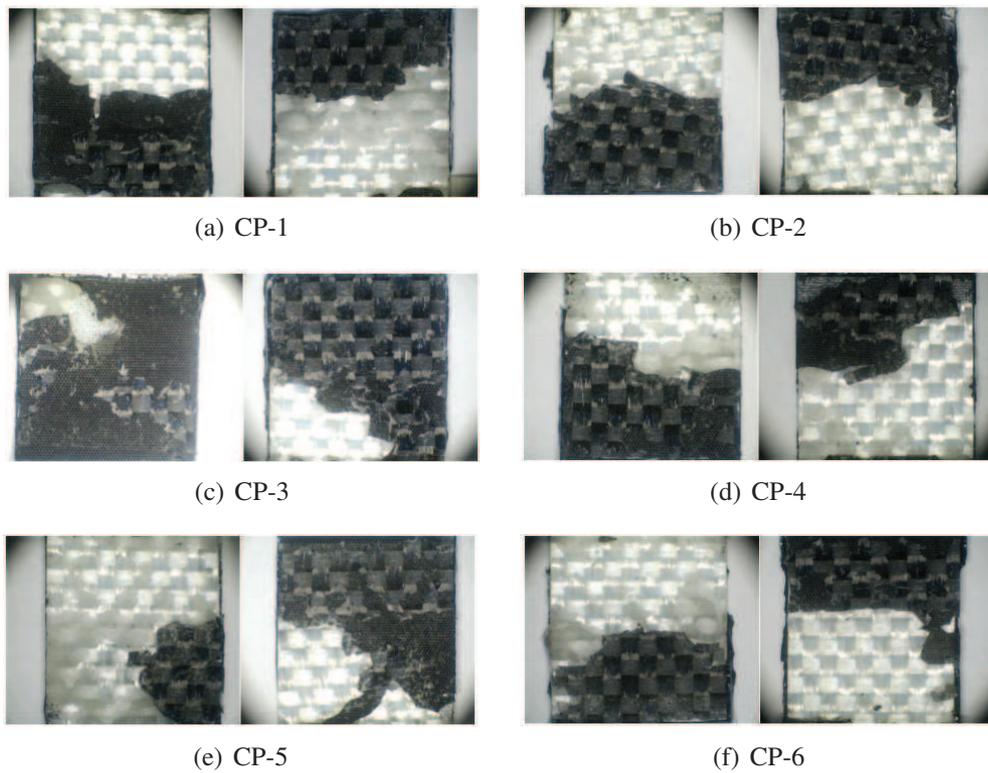


Figura 50: Regiões de falha - Grupo A05-040

#### 5.1.2.4 Visão geral do grupo

Os grupos A05-005, A05-015 e A05-040 analisados não apresentaram valores estatisticamente diferentes tanto para rigidez (FIG. 53) quanto para deslocamento máximo na falha (FIG. 52), de acordo com análise ANOVA realizada com 0,05 de confiança.

Para os valores médios da tensão cisalhante aparente máxima podemos ver um decréscimo de valores à medida que a espessura do adesivo aumenta (FIG. 51) o que corrobora com a literatura. As resistências finais ao cisalhamento foram 25,2% e 14,11% maiores para as espessuras de 0,05 mm (A05-005) e 0,15 mm (A05-015) respectivamente, em comparação à espessura de 0,4 mm.

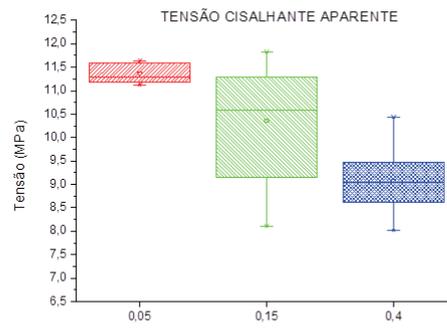


Figura 51: Tensão máxima na ruptura - A05-xxx

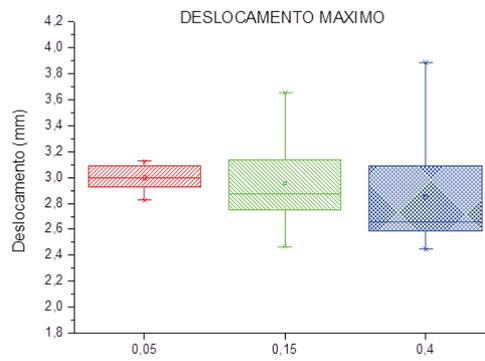


Figura 52: Deslocamento máximo na ruptura - A05-xxx

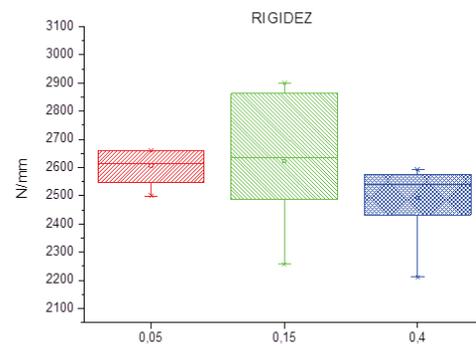


Figura 53: Rigidez Intrínseca - A05-xxx

### 5.1.3 AR300 + 1,0% MWCNT

#### 5.1.3.1 Espessura fina - 0,05 mm (A10-005)

Como é possível ver na tabela 17 a variação da espessura da camada de adesivo foi pequena e aceitável para o método de colagem empregado.

Tabela 17: Espessura média da camada adesiva - A10-005

CP	Espessura Média (mm)	Desvio (mm)
1	0,05922	0,00912
2	0,06051	0,01222
3	0,06264	0,01170
4	0,06042	0,01070
5	0,06331	0,01240
6	0,06771	0,01017

Analisando as curvas deformação x força (FIG.54) e os resultados de tensão (tabela 18) para o grupo em questão, pode-se salientar uma rigidez sem muitas alterações. Dois corpos de prova, CP1 e CP6, destacam-se entre os demais. O CP1 foi o que apresentou maior carga de ruptura, enquanto o CP6 apresenta aparentemente uma falha prematura. Quando observada a região de falha de ambos os CP's, pode-se constatar uma melhor dispersão de nanotubos para o CP1 (FIG.55(a)) o que contribui para a melhoria da capacidade de carga do adesivo. No CP6 (FIG.55(f)) por sua vez é visível a grande quantidade de aglomerados presentes na região de falha. A possível influência da dispersão pode ser observada também quando avaliamos o modo de fratura das duas juntas. O CP1 apresenta um descolamento de primeira camada muito mais intenso que o CP6, o que pode significar uma melhora na resistência da interface entre adesivo e aderente.

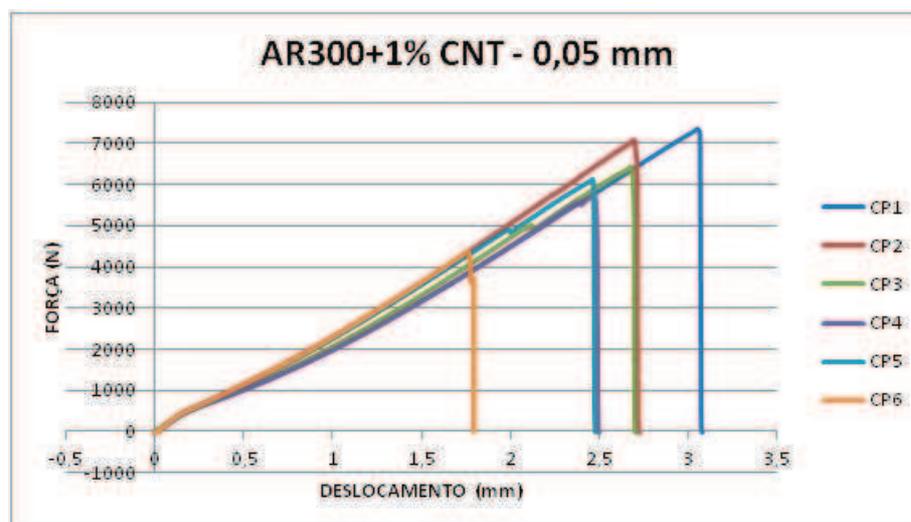


Figura 54: Curva Força x Deslocamento - Grupo A10-005

Tabela 18: Resultados dos ensaios de tração - A10-005

CP	Força Máxima (N)	Tensão Máxima (Mpa)	Desloc. Max. (mm)	Modo de Falha
1	7368,9	11,79	3,058	Misto (30% De LFT intensa)
2	7072,47	11,32	2,704	Misto (17% De LFT intensa)
3	6415,16	10,26	2,691	Misto (10% De LFT intensa)
4	5790,08	9,26	2,482	Misto (29,25% De LFT intensa)
5	6115,51	9,78	2,468	Misto (20% De LFT intensa)
6	4382,03	7,01	1,768	LFT leve

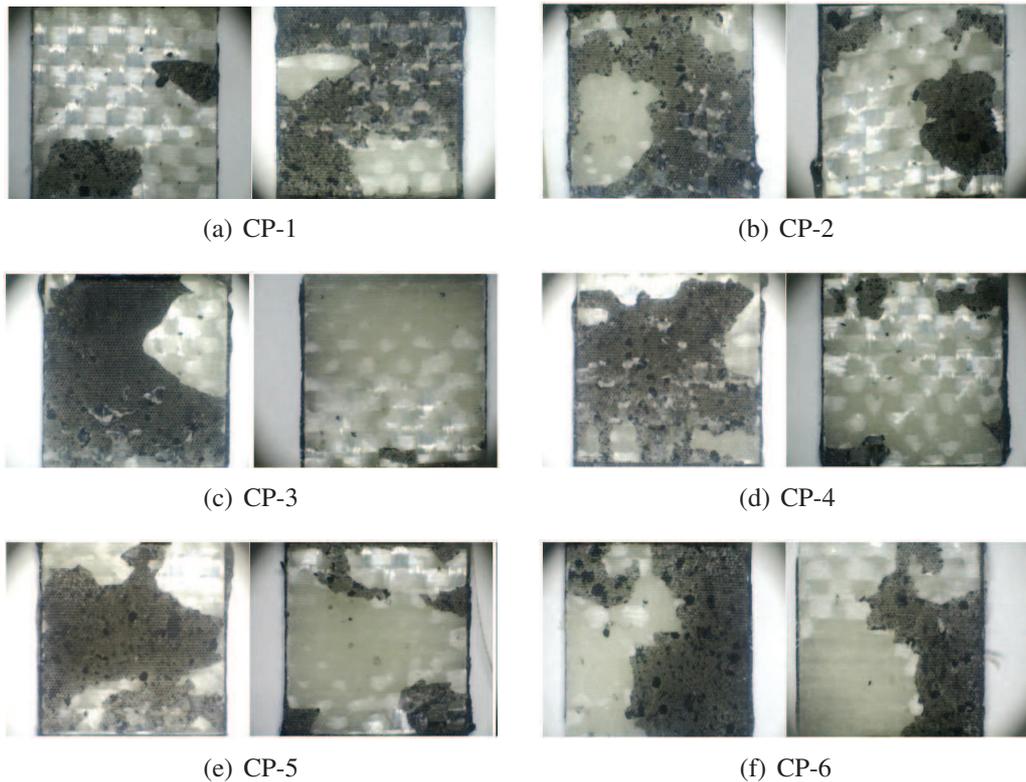


Figura 55: Regiões de falha - Grupo A10-005

### 5.1.3.2 Espessura média - 0,15 mm (A10-015)

A espessura da camada adesiva no conjunto A10-015 se mostrou um pouco maior do que a esperada, porém ainda com pouca variação entre os corpos de prova do grupo (tabela 19).

Tabela 19: Espessura média da camada adesiva - A10-015

CP	Espessura Média (mm)	Desvio (mm)
1	0,18552	0,02262
2	0,18710	0,02103
3	0,17641	0,02217
4	0,18555	0,02821
5	0,17557	0,02308
6	0,18253	0,02685
7	0,18062	0,0238

Analisando os resultados dos ensaios de tração (FIG.56 e tabela 20), observa-se uma variação

muito pequena da rigidez entre os corpos de prova testados, com exceção do CP2. Ao analisar a região de falha deste CP (FIG.57(b)), há indícios de que a falha tenha se iniciado no vértice inferior da região sobreposta, podendo ser um indicativo de que a falha possa ter sido induzida pelo processo de remoção de tapering. Indicativo similar também é observado no CP6 (FIG.57(f)), porém neste as propriedades mecânica parecem não terem sido afetadas.

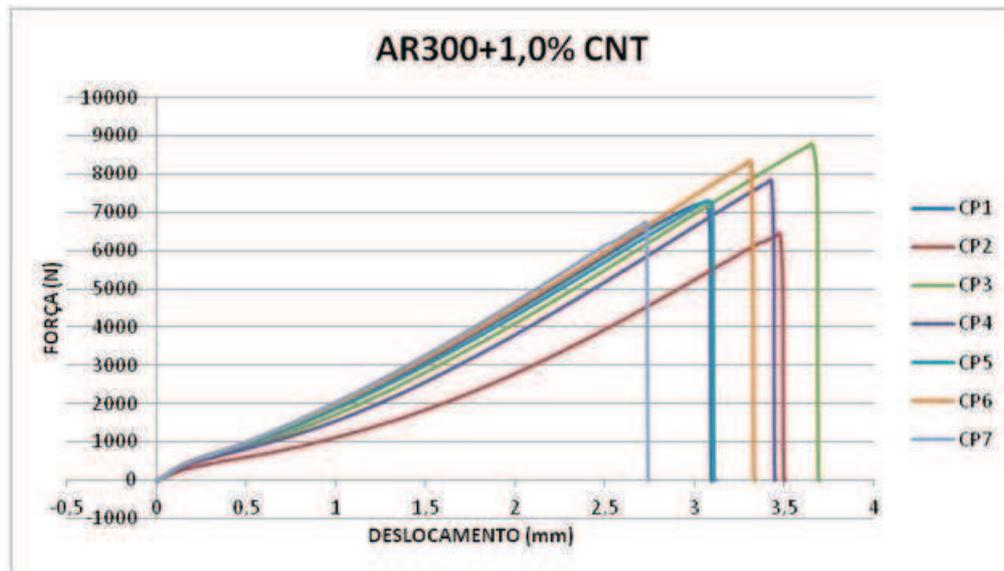


Figura 56: Curva Força x Deslocamento - Grupo A10-015

Tabela 20: Resultados dos ensaios de tração - A10-015

CP	Força Máxima (N)	Tensão Máxima (Mpa)	Desloc. Max. (mm)	Modo de Falha
1	7256,13	11,61	3,073	LFT
2	6421,61	10,27	3,475	LFT
3	8780,17	14,05	3,662	LFT
4	7836,1	12,54	3,433	LFT
5	7294,79	11,67	3,079	LFT
6	8338,75	13,34	3,319	LFT
7	6734,15	10,77	2,731	LFT

Observando as fraturas (FIG.57), o modo dominante para todos os CP's foi um LFT intenso, consistente com um aumento na capacidade de carga na interface aderente/adesivo possivelmente provocado pela dispersão dos nanotubos e responsável pelo aumento da resistência final das juntas.

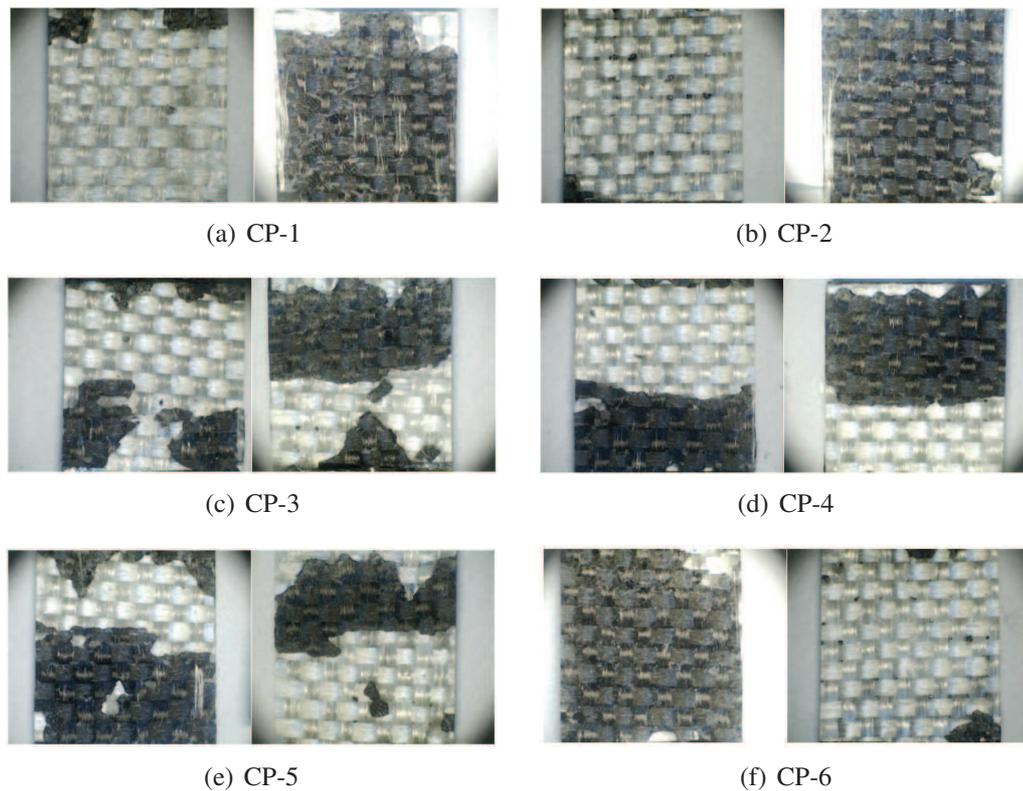


Figura 57: Regiões de falha - Grupo A10-015

### 5.1.3.3 Espessura maior - 0,40 mm (A10-040)

Mais uma vez é possível notar na tabela 21 a dificuldade em garantir o paralelismo dos aderente durante o processo de colagem empregado, tendo em vista que o adesivo é pouco viscoso e a espessura da camada adesiva é relativamente alta.

Tabela 21: Espessura média da camada adesiva - A10-040

CP	Espessura Média (mm)	Desvio (mm)
1	0,29835	0,08360
2	0,34233	0,09895
3	0,31887	0,08368
4	0,29786	0,10465
5	0,27684	0,09376
6	0,32424	0,09613

Devido ao fato exposto acima, mais uma vez também é observada uma variação grande na rigidez das juntas (FIG.58), muito possivelmente decorrente da variação de espessura da camada adesiva (não paralelismo).

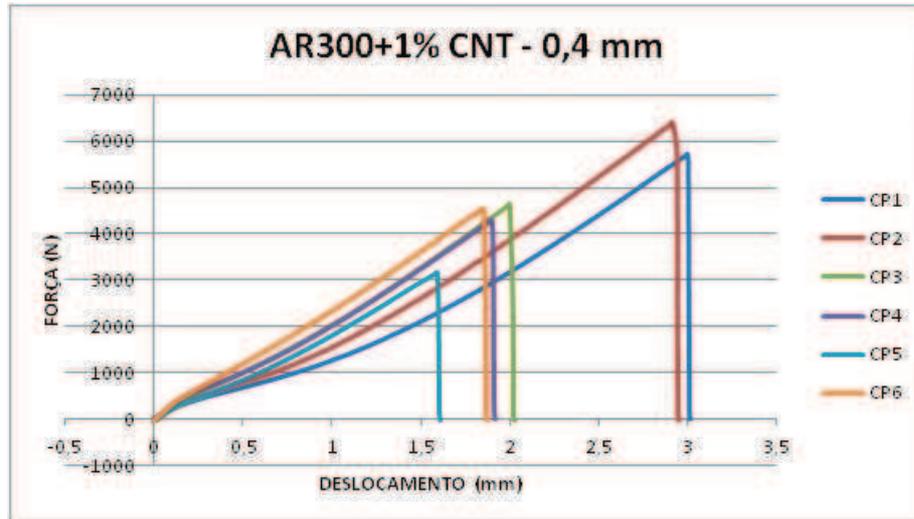


Figura 58: Curva Força x Deslocamento - Grupo A10-040

As regiões de falha (FIG.59) se caracterizam por falhas mistas (LFT e adesiva), aliado a este a fator a distribuição bidimensional (vertical e longitudinal) dos gradientes de tensões e o aumento da espessura da camada adesiva podem ser responsáveis pela diminuição na capacidade de carga das juntas.

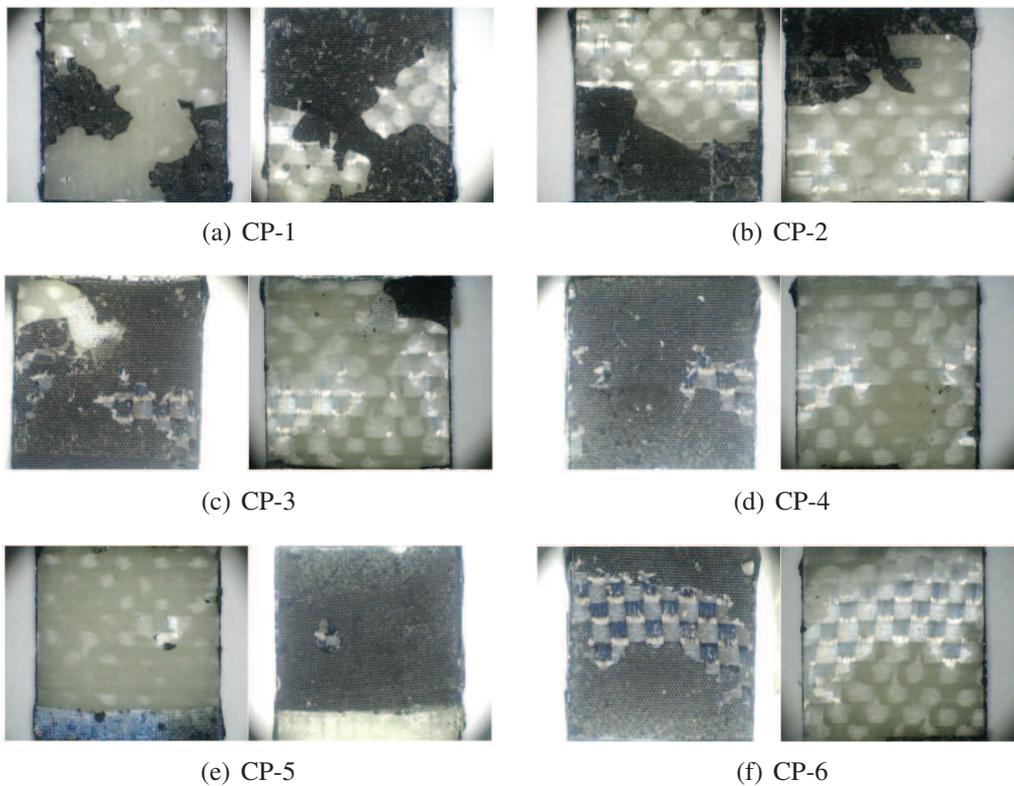


Figura 59: Regiões de falha - Grupo A10-040

#### 5.1.3.4 Visão geral do grupo

Analisando os valores médios de rigidez (FIG.62), tensão cisalhante (FIG.60) e descocamento (FIG.61), pode-se observar que os grupos A10-005 e A10-015 apresentam valores maiores que os mostrados para o grupo A10-040. Para os valores de resistência final o aumento foi de 25,01% e 57,12%, respectivamente. Os valores de deslocamento máximo se mostraram 14,5% e 47,22% maiores para estes dois grupos. Por sua vez, rigidez foi 9,0% maior para o grupo A10-005 e 10,0% para o grupo A10-015.

De uma forma geral as fratura apresentadas pelo grupo 0,15 mm(grupo que mostrou melhor comportamento) foram puramente compostas por LFT, que neste caso se apresentou de forma mais intensa sendo possível observar a presença de filamentos de fibra de vidro sobre a superfície fraturada do adesivo.

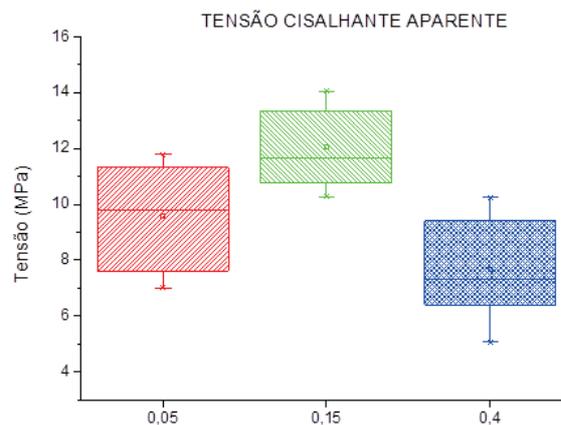


Figura 60: Tensão máxima na ruptura - A10-xxx

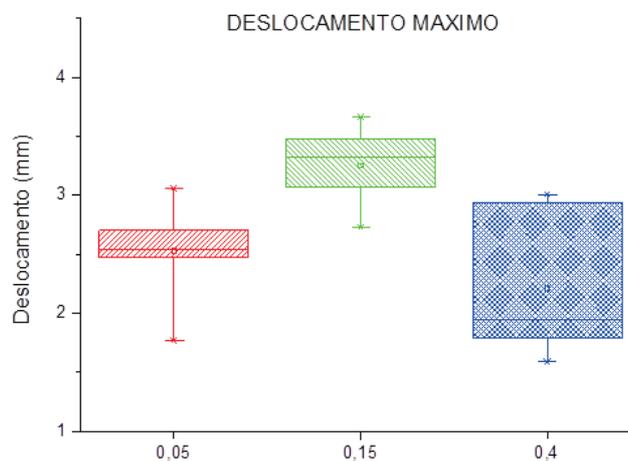


Figura 61: Deslocamento máximo na ruptura - A10-xxx

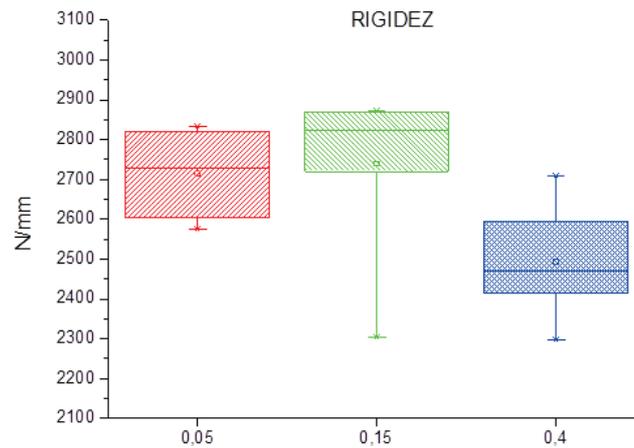


Figura 62: Rigidez Intrínseca - A10-xxx

#### 5.1.4 AR300 + 2,0% MWCNT

##### 5.1.4.1 Espessura fina - 0,05 mm (A20-005)

O grupo A20-005 apresenta espessura da camada variando dentro dos padrões destes experimento (tabela 22)

Tabela 22: Espessura média da camada adesiva - A20-005

CP	Espessura Média (mm)	Desvio (mm)
1	0,06333	0,00948
2	0,06452	0,01262
3	0,06664	0,01226
4	0,06442	0,01124
5	0,0673	0,01284
6	0,07171	0,01057

O gráfico força x deslocamento (FIG.63) apresenta pouca variação de rigidez entre os corpos de prova. A tabela 23 apresenta um resultado de tensão inferior ao esperado para a faixa de espessura trabalhada. A justificativa para este fato pode estar numa má distribuição dos nanotubos de carbono ao longo da região colada. Analisando as regiões de falha (FIG.64) percebe-se que houve uma boa dispersão dos nanotubos, porém regiões com diferentes colorações podem indicar uma má distribuição das nanoestruturas. Essa condição pode ter levado a uma redução na adesão média da interface aderente/adesivo, levando a um modo de falha LFT menos intenso (onde apenas a camada de resina foi arrancada da superfície do aderente, mantendo as fibras preservadas) e a uma redução da tensão última das juntas.

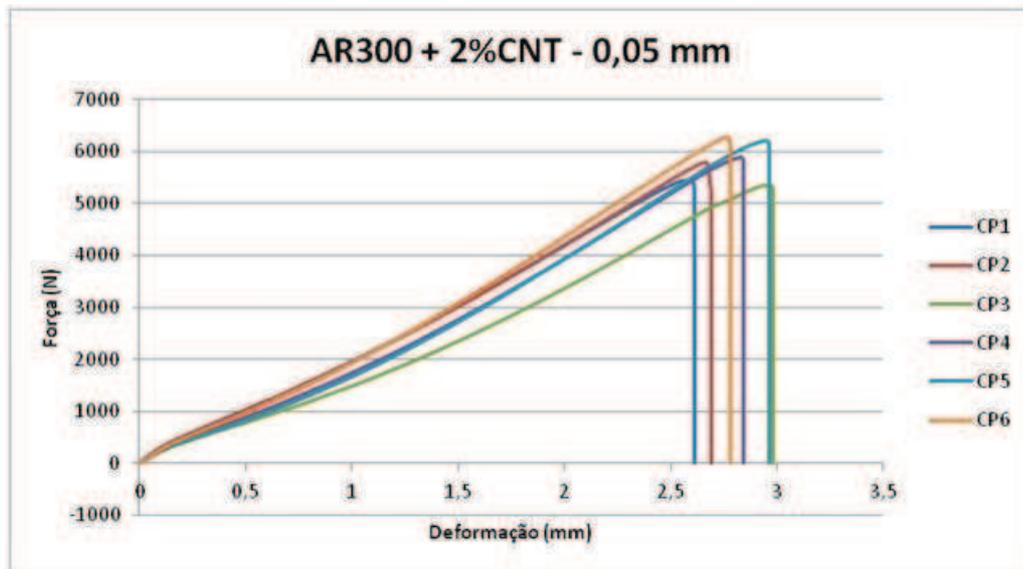
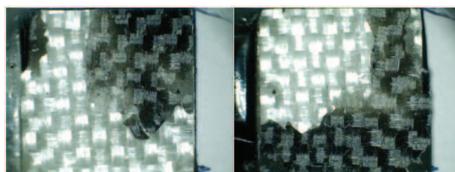


Figura 63: Curva Força x Deslocamento - Grupo A20-005

Tabela 23: Resultados dos ensaios de tração - A20-005

CP	Força Máxima (N)	Tensão Máxima (Mpa)	Desloc. Max. (mm)	Modo de Falha
1	5445,32	8,96	2,583	LFT
2	5783,64	9,27	2,66	LFT
3	5348,65	8,41	2,94	LFT
4	5889,96	9,68	2,832	LFT
5	6218,62	9,86	2,939	LFT
6	6283,06	10,19	2,759	LFT



(a) CP-1



(b) CP-2



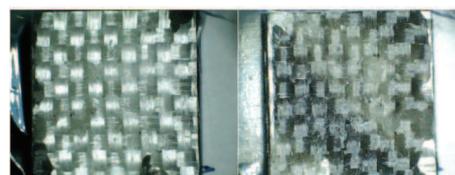
(c) CP-3



(d) CP-4



(e) CP-5



(f) CP-6

Figura 64: Regiões de falha - Grupo A20-005

## 5.1.4.2 Espessura média - 0,15 mm (A20-015)

A tabela 24 apresenta os valores de espessura da camada de adesivo para o grupo A20-015 variando dentro da expectativa.

Tabela 24: Espessura média da camada adesiva - A20-015

CP	Espessura Média (mm)	Desvio (mm)
1	0,16074	0,02032
2	0,16249	0,01827
3	0,1541	0,01971
4	0,16082	0,02503
5	0,15066	0,02071
6	0,15771	0,02455
7	0,15589	0,0215

Analisando os resultados obtidos nos ensaios de tração (tabela 25 e FIG.65) juntamente com as regiões de falha (FIG.66) é possível observar uma boa distribuição e dispersão dos nanotubos no adesivo propiciando um aumento na resistência de cisalhamento da interface. Este fenômeno acaba por gerar um relativo aumento na capacidade de carga do adesivo. Também possível observar o dano intenso nas fibras devido ao arrancamento da primeira camada do compósito.

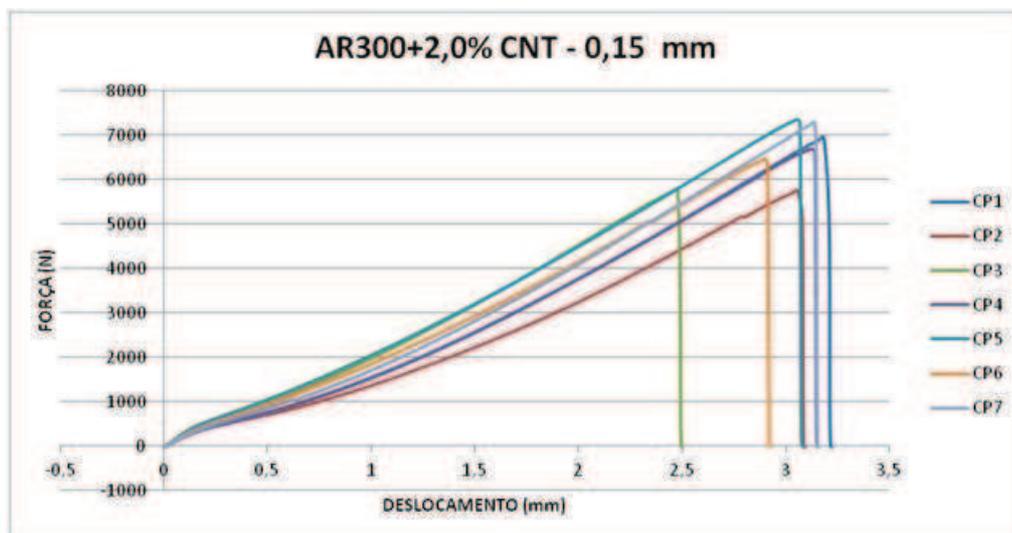


Figura 65: Curva Força x Deslocamento - Grupo A20-015

Tabela 25: Resultados dos ensaios de tração - A20-015

CP	Força Máxima (N)	Tensão Máxima (Mpa)	Desloc. Max. (mm)	Modo de Falha
1	6937,14	11,1	3,181	LFT
2	5738,53	9,18	3,057	LFT
3	5773,97	9,24	2,478	LFT
4	6682,6	10,69	3,124	
5	7362,46	11,78	3,057	LFT
6	6453,83	10,33	2,903	LFT
7	7269,01	11,63	3,138	LFT

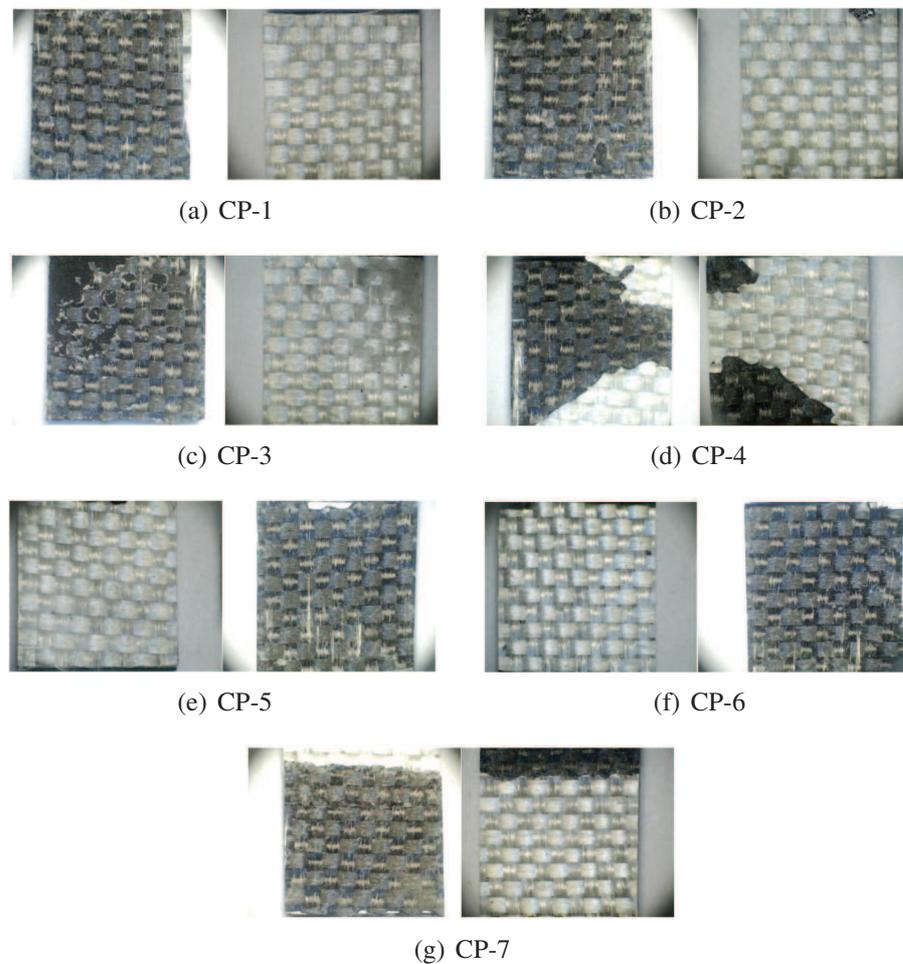


Figura 66: Regiões de falha - Grupo A20-015

#### 5.1.4.3 Espessura maior - 0,4 mm (A20-040)

Os valores de espessura da camada de adesivo para os CPs do grupo A20-040 estão expressos na tabela 26.

Tabela 26: Espessura média da camada adesiva - A20-040

CP	Espessura Média (mm)	Desvio (m)
1	0,33865	0,06788
2	0,38228	0,08283
3	0,35896	0,06717
4	0,33704	0,08659
5	0,31631	0,07769
6	0,36423	0,08102

Analisando os resultados do ensaio de tração (tabela 27 e FIG.67) e as regiões de falha (FIG.68) fica evidente que a má distribuição e dispersão dos nanotubos pode ter sido a causa para os baixos valores de tensão encontrados. Além disso, as regiões de falha se encontram muito fragmentadas com indicio da existência de aglomerado, provocando apenas uma leve descamação da resina

dos aderentes.

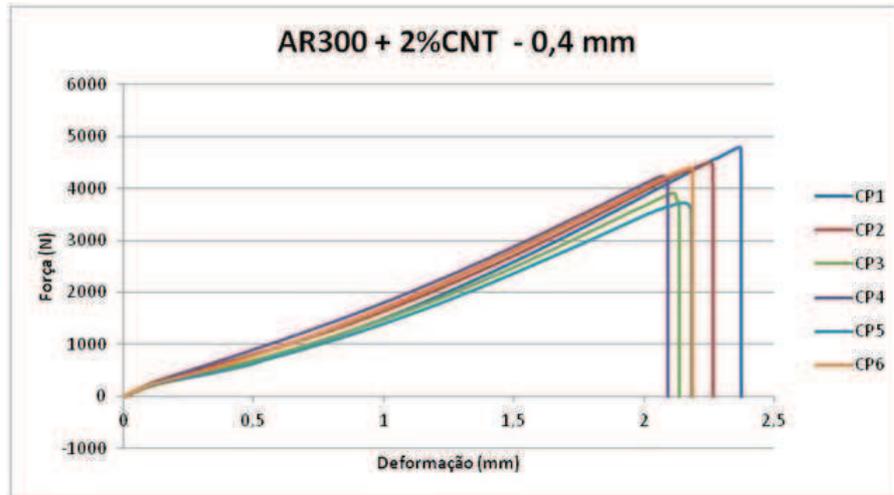


Figura 67: Curva Força x Deslocamento - Grupo A20-040

Tabela 27: Resultados dos ensaios de tração - A20-040

CP	Força Máxima (N)	Tensão Máxima (Mpa)	Desloc. Max. (mm)	Modo de Falha
1	4794,46	7,86	2,368	LFT
2	4485,14	7,22	2,258	LFT
3	3918,05	6,7	2,116	LFT
4	4233,81	6,83	2,081	
5	3727,95	6,07	2,155	LFT
6	4394,92	7,28	2,174	LFT

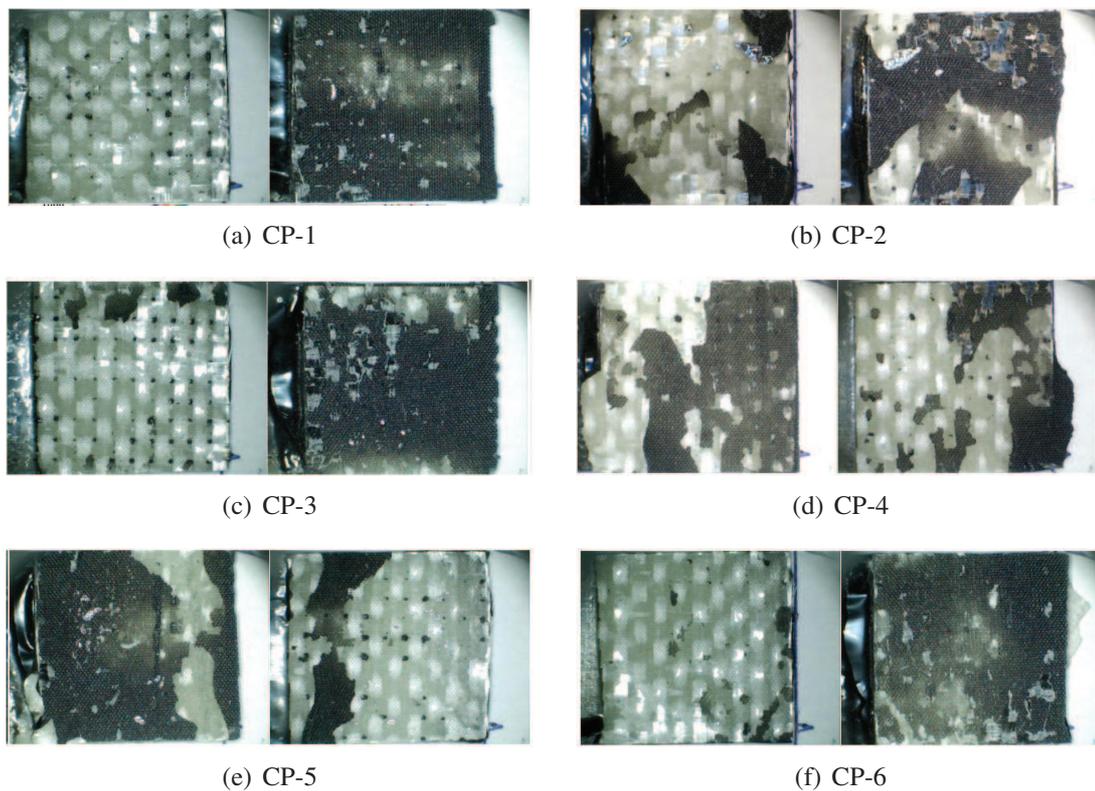


Figura 68: Regiões de falha - Grupo A20-040

#### 5.1.4.4 Visão geral do grupo

De forma geral os grupos de diferentes espessuras analisados apresentaram diferenças significativas nos valores de deslocamento máximo (FIG. 70) e de tensão cisalhante aparente (FIG. 69). Podemos ver que a espessura de 0,4 mm apresentou resultados inferiores que as espessuras de 0,05 mm e 0,15 mm. Os grupos A20-005 e A20-015 apresentaram resistências finais 34,34% e 51,06% superiores ao grupo A20-040. Para estes mesmos grupos os deslocamentos máximos foram 27,3% e 36,4% maiores que grupo A20-040. O grupo A10-015 foi o único que apresentou rigidez estatisticamente superior aos demais grupos, sendo esta 8,5% maior que o grupo A20-040.

Para todos os três grupos o tipo de falha predominante é o LFT, porém vale observar a existência de uma variação de intensidade neste modo de falha. Enquanto para os grupos de 0,05 mm e 0,15 mm a falha se apresenta na forma de uma delaminação mais intensa com a presença de um fragmentos de fibra na adesivo fraturado, o grupo de 0,4 mm apresenta uma forma de LFT mais "leve" onde ainda é possível observar a presença de uma fina camada de resina sobre o aderente fraturado.

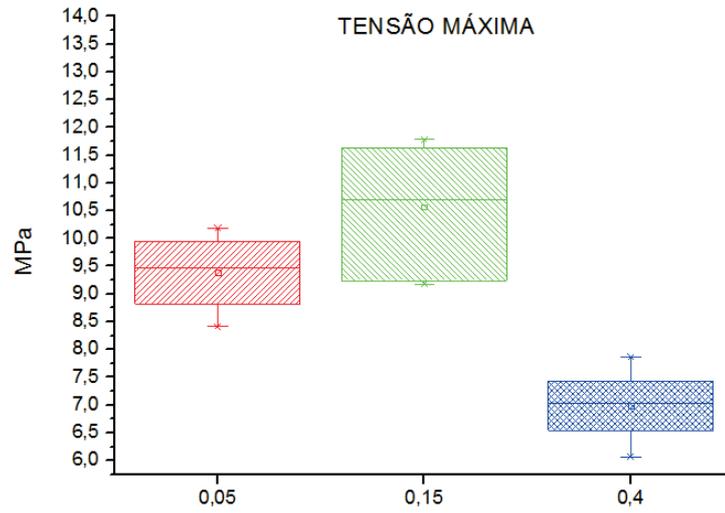


Figura 69: Tensão máxima na ruptura - A20-xxx

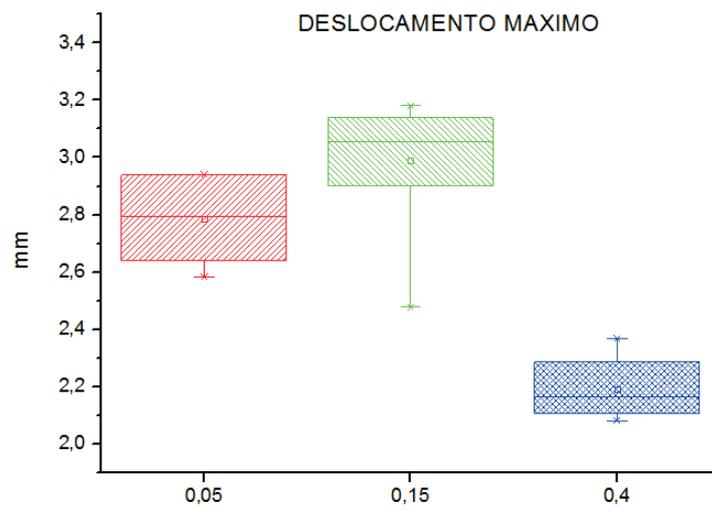


Figura 70: Deslocamento máximo na ruptura - A20-xxx

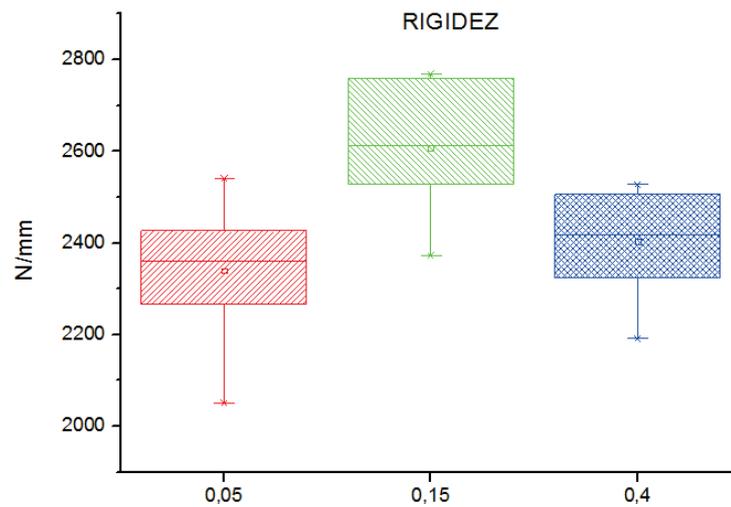


Figura 71: Rigidez Intrínseca - A20-xxx

## 5.2 Influencia da dispersão de MWCNT

### 5.2.1 Espessura de 0,05 mm

As análises estatísticas (ANOVA) para os grupos com espessura de 0,05 mm não mostram médias de deslocamento (FIG.73) e tensão cisalhantes (figura 72) estatisticamente diferentes. Este fato pode estar associado à presença de aglomerados observados nos grupos A05-005 (FIG.46(b), 46(d), 46(e), 46(f)) e A10-005 ( FIG. 55(a), 55(b), 55(d), 55(f)). Por sua vez, no grupo A20-005 observamos uma boa dispersão, porém com uma aparente má distribuição (FIG.64(a), 64(b), 64(d), 64(e)). A distribuição não uniforme de tensões gerada por esses problemas de dispersão e distribuição podem ser os responsáveis pelas propriedades abaixo do esperado.

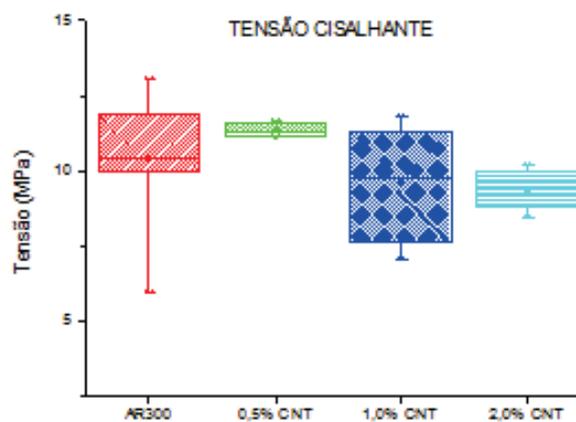


Figura 72: Tensão máxima na ruptura - Espessura 0,05 mm

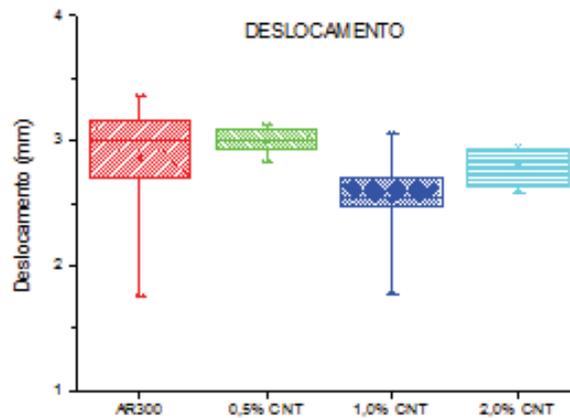


Figura 73: Deslocamento máximo na ruptura - Espessura 0,05 mm

### 5.2.2 Espessura de 0,15 mm

Para a espessura de 0,15 mm o único grupo que mostrou médias de propriedades mecânicas (FIG.74 e 75) estatisticamente diferentes de acordo com análise ANOVA, foi o que recebeu adição de 1,0% de MWCNT. O grupo A10-015 foi o que apresentou melhor condição de dispersão das nanoestruturas o que pode ter contribuído para o melhor desempenho desse grupo. Os demais grupos apresentaram aglomerados de nanotubos, visíveis em suas regiões de falha, que podem ter gerado concentradores de tensões e levado a junta a um desempenho inferior ao esperado.

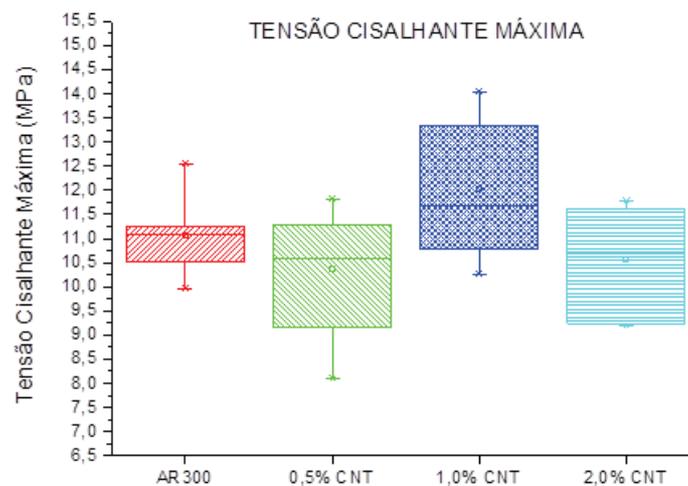


Figura 74: Tensão máxima na ruptura - Espessura 0,15 mm

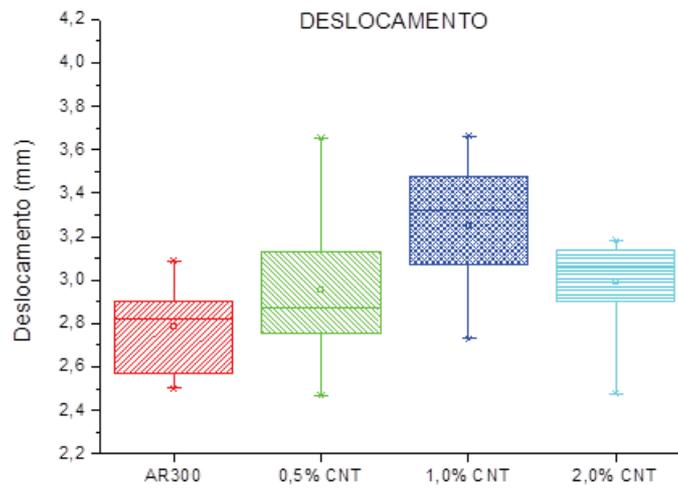


Figura 75: Deslocamento máximo na ruptura - Espessura 0,15 mm

### 5.2.3 Espessura de 0,40 mm

Para os grupos de espessura de 0,4 mm foi observado um efeito contrário ao esperado, em relação à adição de nanotubos. Houve um decréscimo nas propriedades mecânicas (FIG.76 e 77) quando se esperava uma melhora na resistência final da junta. Porém, a análise para esse valor de espessura se torna um pouco mais complexa que os demais. Além de problemas durante a dispersão que geraram aglomerados em alguns casos, como os observados no grupo A20-040, o perfil não paralelo resultante do método de colagem e da baixa viscosidade da resina gera uma distribuição de tensões no interior do adesivo praticamente impossível de se analisar através de métodos analíticos. Estes dois fatores, apesar da dificuldade da análise, parecem ser a causa mais provável para o comportamento observado nas juntas.

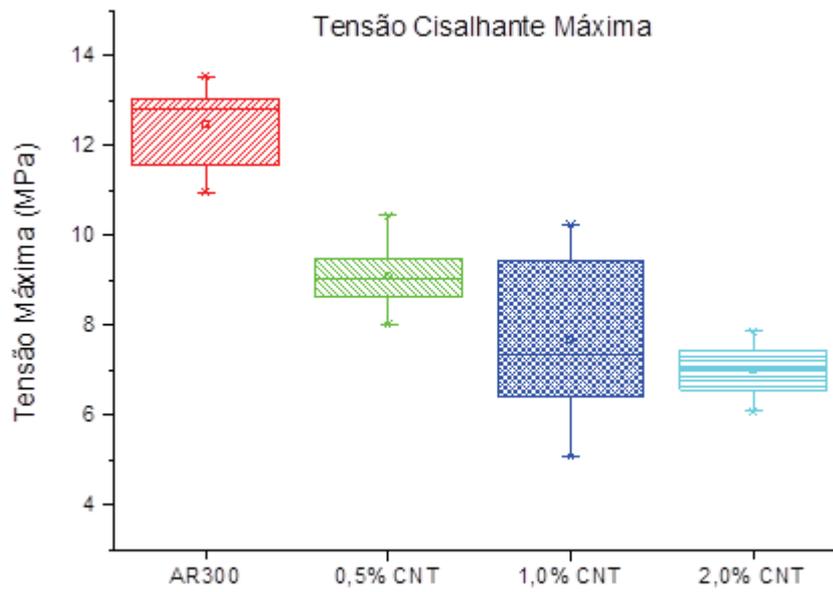


Figura 76: Tensão máxima na ruptura - Espessura 0,40 mm

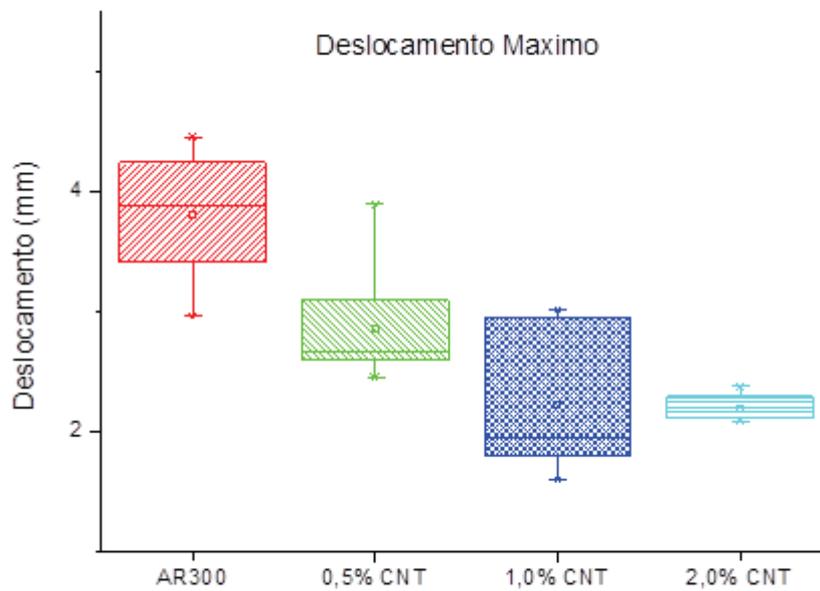


Figura 77: Deslocamento máximo na ruptura - Espessura 0,40 mm

## 6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo realizado sobre a influencia da variação de espessura e da adição de nanotubos sobre o comportamento final de juntas single-lap mostrou resultados interessantes. Analisando a influencia da espessura da camada adesiva sobre as propriedades mecânicas das juntas, podemos constatar significativas alterações. Conforme esperado, houve um aumento na resistência final dos corpos de prova com a redução da espessura da camada adesiva. Para o grupo que recebeu 0,5% de nanotubos de carbono, as resistências finais ao cisalhamento foram 25,2% e 14,11% maiores para as espessuras de 0,05 mm (A05-005) e 0,15 mm (A05-015) respectivamente, em comparação à espessura de 0,4 mm. A análise estatística não mostrou uma variação significativa no deslocamento máximo observado.

Para o grupo com 1,0% de nanotubos de carbono, a resistência final das juntas aumentou 57,12% e 25,01%, respectivamente para os grupos com espessura de 0,15 mm (A10-015) e 0,05 mm (A10-005). O deslocamento máximo observado nos grupos A10-015 e A10-005 foram respectivamente 47,22% e 14,5% maiores que o observado no grupo A10-040. Era esperado que o grupo A10-005 apresentasse melhor desempenho, porém há indícios de que falhas prematuras possam ter sido induzidas durante o processo de retirada de tapering, o que pode ter levado a uma redução na carga final das juntas.

Para os grupos que receberam 2,0% de nanotubos de carbono, o aumento na resistência final das juntas foi de 51,06% e 34,34% para os grupos com espessura de 0,15 mm (A20-015) e 0,05 mm (A20-005). O deslocamento máximo também apresentou significativo aumento de valores com a redução da espessura. Os deslocamentos máximos para os grupos de A20-015 e A20-005 foram 36,45% e 27,3% respectivamente maiores que o apresentado pelo grupo A20-040. Era esperado que o grupo A20-005 apresentasse melhor desempenho, porém a má distribuição das nanoestruturas observada nas regiões de falha pode ter afetado a resistência final do conjunto. As alterações observadas em decorrência da redução da espessura da camada adesiva têm como principal fator uma redistribuição de tensões no interior do adesivo. Devido a espessura muito fina do filme, o adesivo passa a atuar em um estado triplo de tensões.

Para os grupos com espessura de 0,05 mm, as análises estatísticas (ANOVA) não mostraram diferenças significativas entre as médias dos valores encontrados para as propriedades mecânicas (tensão máxima, deslocamento e rigidez). Porém, houve uma significativa mudança nos modos de falha observados nas regiões fraturadas. A adição de nanotubos de carbono ao que parece criou uma interface adesivo/aderente mais resistente, gerando danos maiores à superfície do compósito durante a fratura. Este fenômeno pode ser um indicativo de que a espessura exerceu maior influencia nas propriedades mecânicas das juntas, enquanto os nanotubos governaram os modos de falha.

Para os grupos com espessura de 0,15 mm, as análises estatísticas mostraram um aumento de 16,8% no deslocamento máximo e de 9,2% na tensão máxima de ruptura para o grupo com adição de 1% de nanotubos de carbono (A10-015), em comparação com o grupo que possuía resina pura como adesivo (A00-015). Novamente alterações no modo de falha das juntas foram observadas. O aumento da concentração de nanotubos de carbono levou a falhas LFT mais intensas, efeito também dependente do grau de dispersão das nanoestruturas observado nas regiões de falha.

Por sua vez os grupos com espessura de 0,4 mm apresentaram um efeito contrário ao esperado. Houve um decréscimo nos valores da resistência final e de deslocamento máximo com o aumento da porcentagem em peso das nanoestruturas dispersas. Para a resistência final, os valores médios reduziram 27,28%, 38,65% e 44% para os grupos A05-040, A10-040, A20-040, respectivamente. Já para o deslocamento final a redução observada de 24,97%, 41,88% e 42,33%, respectivamente para os grupos A05-040, A10-040, A20-040. Este comportamento frágil pode ser decorrente principalmente do enrijecimento do adesivo promovido pela adição das nanoestruturas. Outro fator que pode ter influenciado nestes resultados foi perfil não-paralelo obtido durante o processo de colagem

A adição de MWCNT, ao que tudo indica, promoveu a criação de uma interface mais resistente na ligação adesivo-aderente gerando um dano mais significativo na fibra de vidro durante o processo de rompimento da junta. Esse fenômeno foi mais evidente nos conjuntos que apresentavam uma melhor dispersão e distribuição das nanoestruturas (ex.: Grupo A10-015, figura 57). Por sua vez, o surgimento de aglomerados de MWCNT resultantes de uma má dispersão provocou ao que tudo indica uma concentração de tensões que levou a uma maior fragmentação do adesivo que pode ser observada em alguns grupos (ex.: Grupo A10-005, figura 55).

A presença de um perfil não paralelo da camada de adesivo levou, ao que parece, a um comportamento não linear mais pronunciado das curvas de Força-Deslocamento. Este fenômeno, observado nos grupos com espessura de 0,40 mm, foi decorrente do método de colagem empregado e da baixa viscosidade do sistema epóxi AR300 utilizado como adesivo. Este perfil não paralelo impõe a junta um gradiente de tensões (bidimensional) muito mais complexo de se analisar, provocando, ao que parece, uma “acomodação” das camadas adesivas nas primeiras fases do carregamento (ex.: Grupo A00-040, figura 40).

Tendo em vista os resultados e observações feitas neste trabalho, as seguintes sugestões podem ser feitas para trabalhos futuros:

- Estudos empregando outros tipos de adesivos (mais viscosos), que facilitem um maior paralelismo das juntas;
- Análise de outras propriedades mecânicas (fadiga, fratura, etc.)

- Realizar um estudo mais detalhado da influência do perfil da camada adesiva.
  - Validações de simulação numérica.
  - Novos projetos de juntas.
  - A avaliação da multifuncionalidade/detecção de dano dos adesivos nanomodificados.
-

## REFERÊNCIAS

- ACHABY, M.; QUAISS, A. Processing and properties of polyethylene reinforced by graphene nanosheets and carbon nanotubes. *Materials Design*, v. 44, p. 81–89, 2013.
- AIRBUS. *Composite in Airbus: A Long Story of Innovations and Experiences*. [S.l.], 2015.
- AJAYAM, P. M.; SCHADLER, L. S.; BRAUN, P. V. Nanocomposite science and technology. *Wiley-VCH*, n. 230, 2005.
- AVILA, A. F.; YOSHIDA, M. I.; CARVALHO, M. G. R.; DIAS, E. C.; JUNIOR, J. A. An investigation on post-fire behavior of hybrid nanocomposites under bending loads. *Composites Part B: Engineering*, v. 41, p. 380–387, 2010.
- BANEA, M. D.; SILVA, L. F. M. da. Adhesively bonded joints in composite materials: an overview. *Journal of Materials Design and Applications*, v. 223, p. 1–18, 2009.
- BEYER, G. Nanocomposite: a new class of flame retardants for polymers. *Plastics, Additives and Compounding*, v. 4, n. 10, p. 22–7, 2002.
- BILGE, K.; OZDEN-YENIGUN, E.; SIMSEK, E.; MENCELOGLU, Y.; PAPILLAN, M. Structural composite hybrid with epoxy compatible polymer/mwcnt nonfibrous interlayers. *Composite Science and Technology*, v. 72, p. 1639–1645, 2012.
- BUENO, P. O. *Análise Comparativa entre Juntas de "Single-Lap" e "Wavy-Lap" de Compósitos Unidas Por Adesivos*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.
- CALLISTER, W. D. *Materials Science and Engineering*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- CANNILLO, V.; BONDIOLI, F.; LUSVARGHI, L.; MONTORSI, M.; AVELLA, M.; ERRICO, M.; MALINONICO, M. Modeling of ceramic particle filled polymer-matrix nanocomposites. *Composite Science and Technology*, v. 66, p. 1030–1037, 2006.
- CHAWLA, K. K. *Composite Materials: Science and Engineering*. [S.l.]: Springer, 2013.
- CHOI, S.-M.; AWAJI, H. Nanocomposites - a new material design concept. *Science and Technology of Advanced Materials*, v. 6, p. 2–10, 2005.
- COGNARD, J.; CR'HCADDEC, R.; MAURICE, J. Numerical analysis of the stress distribution in single-lap shear tests under elastic assumption - application to the optimisation of the mechanical behavior. *International Journal of Adhesion*, v. 31, p. 715–724, 2011.
- CROCCOMBIE, A.; ASHCROFT, I. *"Single Lap Joint Geometry", Modeling Adhesive Bonded Joints*. Berlin: Springer, 2008.
- CRUZ, D. T. L. da. *Efeito da exposição a luz ultravioleta em adesivo em adesivo nanomodificado por grafeno*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal De Minas Gerais, 2013.
- CRUZ, T. D. L. d.; NETO, A. S.; AVILA, A. F. Nano-modified adhesives by graphene: The effect ageing investigation. *American Institute Of Aeronautics and Astronautics*, v. 54, 2013.
- DANIEL, I. M.; ISHAI, O. *Engineering Mechanics of Composites Materials*. New York: Oxford University Press, 1994.

- EBNESAJJAD, S. (Ed.). *Adhesives Technology Handbook*. Second. [S.l.]: William Andrew, 2008.
- FROGLEY, M.; RAVICH, D.; WAGNER, H. Mechanical properties of carbon nanoparticle reinforced elastomers. *Composite Science and Technology*, v. 63, p. 1647 – 54, 2003.
- GANESH, V. K.; CHOO, T. S. Modulus graded composite adherends for single-lap bonded joints. *Journal of Composite Materials*, v. 36, p. 1757–1767, 2002.
- GEIN, A. K.; NOVOSELEV, K. S. The rise of graphene. *Nature Materials*, v. 6, p. 183–191, 2007.
- GIANNELIS, E. Polymer layered silicate nanocomposites. *Advanced Materials*, v. 8, p. 29–35, 1996.
- GOJNY, F.; WICHMANN, M.; KKE, U.; FIEDLER, B.; SCHULTE, K. Carbon nanotube-reinforced epoxy-composites: enhanced stiffness and fracture toughness at low nanotube content. *Composite Science and Technology*, v. 64, p. 2363–71, 2004.
- GOJNY, F. H.; WICHMANN, M. H.; BAUHOFFER, W.; FIEDLER, G.; SCHULTE, K. Influence of nano-modified on the mechanical and electrical properties of conventional fiber reinforced composites. *Composite Part A - Applied Science*, v. 36, p. 1525–1535, 2005.
- GOJNY, F. H.; WICHMANN, M. H.; FIEDLER, G.; SCHULTE, K. Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites: A comparative study. *Composite Science and Technology*, v. 65, p. 2300–2313, 2005.
- GONG, L.; KINLOCH, I.; YOUNG, R.; RIAZ, I.; JALIL, R.; NOVOSELOV, K. Interfacial stress transfer in a graphene monolayer nanocomposite. *Advanced Materials*, v. 22, p. 2694–2701, 2010.
- GOUDA, S. P. S.; RAGHAVENDRA, K.; KURBET S., N.; DAYANANDA, J. Effects of multi walled carbon nanotubes and graphene on the mechanical properties of hybrid polymer composites. *Advanced Materials Letters*, v. 4, p. 261–270, 2013.
- HAGHANI, R.; ALEMIRANI, M.; KLIGER, R. Effect of laminate tapering on strain distribution in adhesive joints: Experimental investigation. *Journal of Composite Materials*, v. 29, p. 972–985, 2010.
- HER, S. C. Stress analysis of adhesively-bonded lap joints, composites structures. p. 673–678, 1999.
- HERNANDEZ, E.; GOZE, C.; BERNIER, P.; RUBIO, A. Elastic properties of c and  $b_x c_y n_z$  composite nanotubes. *Physics Review Letter*, v. 80, n. 20, p. 4502–4505, 1998.
- HUSSAIN, F.; OKAMOTO, O.; GORGA, R. Review article: Polymer matrix nanocomposite, processing manufacturing and application: an overview. *Journal of Composite Materials*, v. 40, n. 17, p. 1511–1575, 2006.
- ICHKITIDZE, -L.; PODGAETSKY, V.; SELISHCHEV, S.; BLAGOV, E.; GALPERIN, V.; SHAMAN, Y.; PAVLOV, A.; KITSYUK, E. Electrically-conductive composite nanomaterial with multi-walled carbon nanotubes. *Materials Science and Application*, v. 4, p. 1–7, 2013.
- IJIMA, S. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, v. 354, p. 56–64, 1991.

- JONES, R. M. *Mechanics of Composite Materials*. Second edition. Blacksburg, Virginia: Taylor and Francis, 1999.
- KANG, I.; HEUNG, Y.; KIM, J.; LEE, J.; GALLAPUDI, R.; S, S.; NARASIMHADEVARA, S.; HURD, D.; KIRIKERA, G. R.; SHANOV, V.; SHULZ, M.; DONGLU, S.; BOERIO, J.; MALL, S.; RUGGLES-WREN, M. Introduction to carbon nanotube and nanofiber smart material. *Composite Part B*, v. 37, p. 382–394, 2006.
- KRISHMAN, A.; DUJARDIN, E.; EBBESEN, T.; TREACY, P. Y. M. Young's modulus of single-walled carbon nanotubes. *Physics Review B*, v. 58, n. 20, p. 14013–14019, 1998.
- KUILLA, T.; ARIVASTAVA, S.; BHOWMICK, A. K. Rubber/ldh nanocomposites by solution blending. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 111, p. 635–641, 2009.
- LEE, C.; WEI, X.; KYSAR, J.; HONE, J. Measurements of the elastic properties and intrinsic strength of monolayers graphene. *Science*, v. 321, p. 365–393, 2008.
- LI, S.; THOULESS, M. D.; WAAS, A. M.; SCHROEDER, J. A.; ZAVATTIERI, P. Use of mode-I cohesive-zone models to describe the fracture of an adhesively-bonded polymermatrix composite. *Composite Science and Technology*, v. 65, p. 281–293, 2005.
- MALLICK, P. K. *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*. Third edition. [S.l.]: Taylor & Francis Group, 2007.
- MARINKOVIC, S. N. Carbon nanotubes. *Journal of Serbian Chemical Society*, v. 73, p. 891–913, 2008.
- MILANI, M. A.; GONZALEZ, D.; QUIJADA, R.; BASSO, N. R. S.; CERRADA, M. L.; AZAMBUJA, D. S.; GALLAND, G. B. Polypropylene/graphene nanosheet nanocomposites by in situ polymerization: Synthesis, characterization and fundamental properties. *Composite Science and Technology*, v. 84, p. 1–7, 2013.
- MITTAL, V. Functional polymer nanocomposites with graphene: A review. *Macromolecular Materials and Engineering*, v. 299, p. 906–931, 2014.
- NAGANUMA, T.; KAGAWA, Y. Effect of particle size on the optically transparent nanometer-order glass particle-dispersed epoxy matrix composite. *Composite Science and Technology*, v. 62, n. 9, p. 1187–1214, 2002.
- NATSUKI, T.; TANTRAKARN, K.; ENDO, M. Effects of carbon nanotubes structures on mechanical properties. *Applied Physics A*, v. 79, p. 117–124, 2004.
- NETO, A. S. *Desenvolvimento de Adesivo Nanomodificado por Grafeno*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.
- NETO, A. S.; CRUZ, D. T. L. da; AVILA, A. F. Nano-modified adhesive by graphene: The single-lap-joint case. *Materials Research*, 2013.
- ODEGARD, G.; CLANCYB, T.; GATESC, T. Modeling of the mechanical properties of nanoparticle polymer composites. *Polymer*, 2004.
- OGASAWARA, T.; ISHIDA, Y.; ISHIKAWA, T.; YOKOTA, R. Characterization of multi-walled carbon nanotube/phenylethynyl terminated polyimide composites. *Composites Part A*, v. 35, p. 67–74, 2004.

- PANIGRAHI, S. K.; PRADHAN, B. Three dimensional failure analysis and damage propagation behavior of adhesively bonded single lap joint in laminated frp composite. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 26, p. 183–201, 2007.
- PARK, H.; KIM, H. Damage resistance of single lap adhesive composite joints by transverse ice impact. *International Journal of Impact Engineering*, v. 37, n. 2, p. 177–184, 2010.
- PAVLIDOU, S.; PAPASPYRADES, C. A review on polymer-layered silicate nanocomposites. *Progress in Polymer Science*, v. 33, p. 1119–1198, 2008.
- PEREIRA, G. C. *Nanocompositos Híbridos Modificados com nanotubos de carbono: síntese e caracterização*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.
- POPOV, V.; DOREN, V. V. Elastic properties of single walled carbon nanotubes. *Physics Review B*, v. 61, n. 4, p. 3078–3084, 2000.
- PRASEK, J.; DRBOHLAVOVA, J.; CHOMOUCKA, J.; HUBALEK, J.; JASEK, O.; ADAM, V.; KIZEK, R. Method for carbon nanotubes synthesis - review. *Journal of Materials Chemistry*, v. 21, p. 15872–15884, 2011.
- SEYHAN, A. T.; TANOGLU, M.; SCHULTE, K. Mode i and mode ii fracture toughness of e-glass non-crimp fabric/carbon nanotubes (cnt) modified polymer based composites. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 2008, n. 75, p. 5151–5162, 2008.
- SHEN, X.-J.; PEI, X.-Q.; FU, S.-Y.; FRIEDRICH, K. Significantly modified tribological performance of epoxy nanocomposites at very low graphene oxide content. *Polymer*, v. 54, p. 1234–1242, 2013.
- SINGH, R.; ZHANG, M.; CHANG, D. Toughening of a brittle thermosetting polymer effects of reinforcement particle size and volume fraction. *Journal of Materials Science*, v. 37, n. 4, p. 781–8, 2002.
- SMITH, W. *Principals of Materials Science and Engineering*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1998.
- STRONG, A. B. *Fundamentals of Composites Manufacturing: materials, methods and applications*. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 2008.
- TAI, N.; YEH, M.; LIU, J. Enhancement of the mechanical properties of carbon nanotube/phenolic composites using a carbon nanotube network as the reinforcement. *Carbon*, v. 42, p. 2774 – 2781, 2004.
- THOMPSON, C.; HERRING, H.; GATES, T.; CONNELL, J. Preparation and characterization of metal oxide/polyamide nanocomposites. *Composite Science and Technology*, v. 63, n. 11, p. 1591–8, 2003.
- THOSTENSON, E. T.; LI, C.; CHOU, T. W. Nanocomposites in context. *Composite Science and Technology*, v. 65, p. 491–516, 2005.
- TONG, L.; STEVEN, G. P. Analysis and design of structural bonded joints. *Kluwer Academic Publishers*, 1999.
- TREACY, M.; EBBESEN, T. W.; GIBSON, J. Exceptionally high young's modulus observed for individual carbon nanotubes. *Nature*, v. 381, p. 678–680, 1996.

WAHAB, M. M. A.; ASHCROFT, I. A.; CROCOMBE, A. D. A comparison of failure prediction methods for an adhesively bonded composite beam. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, v. 39, p. 173–185, 2003.

WONG, E. W.; SHEEHAN, P. E.; LIEBER, C. M. Nanobeam mechanics: Elasticity, strength, and toughness of nanorods and nanotubes. *Science*, v. 277, n. 5334, p. 1971–1975, 1997.

YADAV, S. K.; CHO, J. W. Functionalized graphene nanoplatelets for enhanced mechanical and thermal properties of polyurethane nanocomposites. *Applied Surface Science*, v. 266, p. 360–367, 2013.

YOUNG, R. J.; KINLOCH, I. A.; GONG, L.; NOVOSELOV, K. S. The mechanics of graphene nanocomposites: A review. *Composite Science and Technology*, v. 72, p. 1459–1476, 2012.

ZAMAN, I.; PHAN, T. T.; KUAN, H.-C.; MENG, Q.; LA, L. T. B.; LUONG, L.; YOUSSEF, O.; MA, J. Epoxy/graphene nanoplatelets nanocomposites with two levels of interface strength. *Polymer*, v. 52, p. 1603–1611, 2011.

## APÊNDICE A – ANÁLISE ANOVA

ANOVAOneWay (10/03/2016 20:18:34)

### Descriptive Statistics

	N Analysis	N Missing	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
0,05	8	0	2,86812	0,49532	0,17512
0,15	7	0	2,78529	0,19918	0,07528
0,4	8	0	3,801	0,50273	0,17774

### One Way ANOVA

#### Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	4,9502	2,4751	13,29073	2,12896E-4
Error	20	3,72455	0,18623		
Total	22	8,67474			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.

Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.

At the 0.05 level, the population means are significantly different.

### Fit Statistics

	R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
	0,57064	0,13624	0,43154	3,16739

### Means Comparisons

#### Tukey Test

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
0,15 0,05	-0,08284	0,22334	0,52454	0,92725	0,05	0	-0,64789	0,48221
0,4 0,05	0,93288	0,21577	6,1143	9,22501E-4	0,05	1	0,38698	1,47877
0,4 0,15	1,01571	0,22334	6,43151	5,49927E-4	0,05	1	0,45066	1,58076

Sig equals 1 indicates that the difference of the means is significant at the 0,05 level.

Sig equals 0 indicates that the difference of the means is not significant at the 0,05 level.

Figura 78: Análise ANOVA - Deslocamento Máximo para Grupo A00-xxx

ANOVAOneWay (20/03/2016 21:19:42)

Descriptive Statistics

	N Analysis	N Missing	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
0,05	8	0	10,42	2,12214	0,75029
0,15	7	0	11,05429	0,79198	0,29934
0,4	8	0	12,48625	0,91686	0,32416

One Way ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	17,85217	8,92609	4,33598	0,02727
Error	20	41,17216	2,05861		
Total	22	59,02433			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.

Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.

At the 0.05 level, the population means are significantly different.

Fit Statistics

	R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
	0,30245	0,12662	1,43478	11,33174

Means Comparisons

Tukey Test

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
0,15 0,05	0,63429	0,74257	1,20798	0,67452	0,05	0	-1,24439	2,51296
0,4 0,05	2,06625	0,71739	4,07325	0,02404	0,05	1	0,25127	3,88123
0,4 0,15	1,43196	0,74257	2,72715	0,15672	0,05	0	-0,44671	3,31064

Sig equals 1 indicates that the difference of the means is significant at the 0.05 level.

Sig equals 0 indicates that the difference of the means is not significant at the 0.05 level.

Figura 79: Análise ANOVA - Tensão Máxima para Grupo A00-xxx

ANOVAOneWay (20/03/2016 18:50:19)

Descriptive Statistics

	N Analysis	N Missing	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
0,05	7	1	2605,03386	142,65301	53,91777
0,15	7	1	2717,68543	121,89534	46,07211
0,4	8	0	2586,636	163,78986	57,90846

One Way ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	72842,03399	36421,017	1,73416	0,20335
Error	19	399039,96972	21002,10367		
Total	21	471882,00371			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.

Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.

At the 0.05 level, the population means are not significantly different.

Fit Statistics

	R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
	0,15436	0,05502	144,92103	2634,18741

Means Comparisons

Tukey Test

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
0,15 0,05	112,65157	77,46355	2,05662	0,33442	0,05	0	-84,1393	309,44244
0,4 0,05	-18,39786	75,00376	0,3469	0,96743	0,05	0	-208,9398	172,14408
0,4 0,15	-131,04943	75,00376	2,47097	0,21411	0,05	0	-321,59137	59,49251

Sig equals 1 indicates that the difference of the means is significant at the 0,05 level.

Sig equals 0 indicates that the difference of the means is not significant at the 0,05 level.

Figura 80: Análise ANOVA - Rigidez para Grupo A00-xxx

ANOVAOneWay (10/03/2016 20:27:55)

Descriptive Statistics

	N Analysis	N Missing	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
0,05	7	0	2,99586	0,10274	0,03883
0,15	7	0	2,95529	0,36872	0,13936
0,4	6	0	2,85183	0,52189	0,21306

One Way ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	0,07007	0,03503	0,26577	0,76974
Error	17	2,24094	0,13182		
Total	19	2,311			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.

Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.

At the 0.05 level, the population means are not significantly different.

Fit Statistics

	R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
	0,03032	0,12356	0,36307	2,93845

Means Comparisons

Tukey Test

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
0,15 0,05	-0,04057	0,19407	0,29565	0,97623	0,05	0	-0,53842	0,45728
0,4 0,05	-0,14402	0,20199	1,00835	0,75923	0,05	0	-0,66221	0,37416
0,4 0,15	-0,10345	0,20199	0,7243	0,86648	0,05	0	-0,62163	0,41473

Sig equals 1 indicates that the difference of the means is significant at the 0,05 level.

Sig equals 0 indicates that the difference of the means is not significant at the 0,05 level.

Figura 81: Análise ANOVA - Deslocamento Máximo para Grupo A05-xxx

ANOVAOneWay (10/03/2016 20:23:33)

Descriptive Statistics

	N Analysis	N Missing	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
0,05	7	0	11,36857	0,20868	0,07887
0,15	7	0	10,36143	1,29637	0,48998
0,4	6	0	9,08	0,78256	0,31948

One Way ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	16,93232	8,46616	10,73523	9,6657E-4
Error	17	13,40677	0,78863		
Total	19	30,3391			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.

Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.

At the 0.05 level, the population means are significantly different.

Fit Statistics

	R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
	0,5581	0,08597	0,88805	10,3295

Means Comparisons

Tukey Test

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
0,15 0,05	-1,00714	0,47468	3,00056	0,11503	0,05	0	-2,22487	0,21058
0,4 0,05	-2,28857	0,49407	6,55081	6,61811E-4	0,05	1	-3,55602	-1,02112
0,4 0,15	-1,28143	0,49407	3,66796	0,0473	0,05	1	-2,54888	-0,01398

Sig equals 1 indicates that the difference of the means is significant at the 0.05 level.

Sig equals 0 indicates that the difference of the means is not significant at the 0.05 level.

Figura 82: Análise ANOVA - Tensão Máxima para Grupo A05-xxx

ANOVAOneWay (20/03/2016 18:44:00)

Descriptive Statistics

	N Analysis	N Missing	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
0,05	7	0	2607,49036	62,47597	23,6137
0,15	7	0	2622,92199	221,20022	83,60582
0,4	6	1	2493,5899	142,15768	58,03563

One Way ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	62953,65164	31476,82582	1,28003	0,30351
Error	17	418040,73331	24590,63137		
Total	19	480994,38495			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.

Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.

At the 0.05 level, the population means are not significantly different.

Fit Statistics

	R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
	0,13088	0,06081	156,814	2578,72129

Means Comparisons

Tukey Test

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
0,15 0,05	15,43163	83,82061	0,26036	0,98151	0,05	0	-199,5969	230,46016
0,4 0,05	-113,90046	87,24326	1,84633	0,41135	0,05	0	-337,70925	109,90833
0,4 0,15	-129,33209	87,24326	2,09647	0,32368	0,05	0	-353,14088	94,4767

Sig equals 1 indicates that the difference of the means is significant at the 0,05 level.

Sig equals 0 indicates that the difference of the means is not significant at the 0,05 level.

Figura 83: Análise ANOVA - Rigidez para Grupo A05-xxx

ANOVAOneWay (10/03/2016 20:37:36)

Descriptive Statistics

	N Analysis	N Missing	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
0,05	7	0	2,53014	0,39198	0,14815
0,15	7	0	3,25314	0,31318	0,11837
0,4	6	0	2,20967	0,59837	0,24428

One Way ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	3,78294	1,89147	9,74219	0,00152
Error	17	3,30059	0,19415		
Total	19	7,08352			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.

Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.

At the 0.05 level, the population means are significantly different.

Fit Statistics

	R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
	0,53405	0,16398	0,44063	2,68705

Means Comparisons

Tukey Test

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
0,15 0,05	0,723	0,23553	4,34126	0,01807	0,05	1	0,1188	1,3272
0,4 0,05	-0,32048	0,24514	1,84881	0,41042	0,05	0	-0,94935	0,3084
0,4 0,15	-1,04348	0,24514	6,01976	0,00146	0,05	1	-1,67235	-0,4146

Sig equals 1 indicates that the difference of the means is significant at the 0.05 level.

Sig equals 0 indicates that the difference of the means is not significant at the 0.05 level.

Figura 84: Análise ANOVA - Deslocamento Máximo para Grupo A10-xxx

ANOVAOneWay (10/03/2016 20:34:47)

Descriptive Statistics

	N Analysis	N Missing	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
0,05	7	0	9,57571	1,77961	0,67263
0,15	7	0	12,03571	1,35693	0,51287
0,4	6	0	7,66	1,81518	0,74104

One Way ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	62,74178	31,37089	11,46298	7,0493E-4
Error	17	46,52414	2,73671		
Total	19	109,26592			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.

Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.

At the 0.05 level, the population means are significantly different.

Fit Statistics

	R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
	0,57421	0,16775	1,6543	9,862

Means Comparisons

Tukey Test

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
0,15 0,05	2,46	0,88426	3,93432	0,03252	0,05	1	0,19157	4,72843
0,4 0,05	-1,91571	0,92037	2,94364	0,12358	0,05	0	-4,27677	0,44535
0,4 0,15	-4,37571	0,92037	6,72361	5,11939E-4	0,05	1	-6,73677	-2,01465

Sig equals 1 indicates that the difference of the means is significant at the 0.05 level.

Sig equals 0 indicates that the difference of the means is not significant at the 0,05 level.

Figura 85: Análise ANOVA - Tensão Máxima para Grupo A10-xxx

ANOVA OneWay (20/03/2016 18:42:14)

Descriptive Statistics

	N Analysis	N Missing	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
0,05	6	1	2715,36297	105,00622	42,86861
0,15	7	0	2739,34937	200,34353	75,72274
0,4	6	1	2492,83248	135,90191	55,48172

One Way ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	229433,81853	114716,90927	4,7269	0,02437
Error	16	388303,36536	24268,96034		
Total	18	617737,18389			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.

Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.

At the 0.05 level, the population means are significantly different.

Fit Statistics

	R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
	0,37141	0,0587	155,78498	2653,92728

Means Comparisons

Tukey Test

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
0,15 0,05	23,9864	86,67076	0,39139	0,95877	0,05	0	-199,6517	247,62449
0,4 0,05	-222,5305	89,9425	3,49896	0,06124	0,05	0	-454,61072	9,54972
0,4 0,15	-246,51689	86,67076	4,02244	0,02983	0,05	1	-470,15499	-22,8788

Sig equals 1 indicates that the difference of the means is significant at the 0,05 level.

Sig equals 0 indicates that the difference of the means is not significant at the 0,05 level.

Figura 86: Análise ANOVA - Rigidez para Grupo A10-xxx

ANOVAOneWay (20/03/2016 18:09:09)

Descriptive Statistics

	N Analysis	N Missing	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
0,05	6	0	2,7855	0,14632	0,05974
0,15	7	0	2,99114	0,24325	0,09194
0,4	6	0	2,192	0,105	0,04286

One Way ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	2,17259	1,0863	33,60559	1,86856E-6
Error	16	0,5172	0,03232		
Total	18	2,68979			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.

Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.

At the 0.05 level, the population means are significantly different.

Fit Statistics

	R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
	0,80772	0,06724	0,17979	2,67384

Means Comparisons

Tukey Test

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
0,15 0,05	0,20564	0,10003	2,90746	0,13111	0,05	0	-0,05246	0,46374
0,4 0,05	-0,5935	0,1038	8,08589	8,92969E-5	0,05	1	-0,86134	-0,32566
0,4 0,15	-0,79914	0,10003	11,29858	1,54455E-6	0,05	1	-1,05724	-0,54104

Sig equals 1 indicates that the difference of the means is significant at the 0.05 level.

Sig equals 0 indicates that the difference of the means is not significant at the 0.05 level.

Figura 87: Análise ANOVA - Deslocamento Máximo para Grupo A20-xxx

**ANOVA OneWay (20/03/2016 18:07:21)**

**Descriptive Statistics**

	N Analysis	N Missing	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
0,05	6	0	9,395	0,64878	0,26486
0,15	7	0	10,56429	1,05209	0,39765
0,4	6	0	6,99333	0,60827	0,24832

**One Way ANOVA**

**Overall ANOVA**

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	42,13911	21,06956	31,81555	2,65643E-6
Error	16	10,59585	0,66224		
Total	18	52,73497			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.

Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.

At the 0.05 level, the population means are significantly different.

**Fit Statistics**

	R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
	0,79907	0,08975	0,81378	9,06737

**Means Comparisons**

**Tukey Test**

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
0,15 0,05	1,16929	0,45275	3,65242	0,04978	0,05	1	0,00106	2,33752
0,4 0,05	-2,40167	0,46984	7,22904	2,91592E-4	0,05	1	-3,614	-1,18934
0,4 0,15	-3,57095	0,45275	11,15434	1,83368E-6	0,05	1	-4,73918	-2,40272

Sig equals 1 indicates that the difference of the means is significant at the 0.05 level.

Sig equals 0 indicates that the difference of the means is not significant at the 0.05 level.

Figura 88: Análise ANOVA - Tensão Máxima para Grupo A20-xxx

ANOVAOneWay (20/03/2016 18:47:20)

Descriptive Statistics

	N Analysis	N Missing	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
0,05	6	1	2339,63405	159,83286	65,25149
0,15	7	0	2606,95286	137,99872	52,15862
0,4	6	1	2403,90621	119,42909	48,75672

One Way ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	2	256925,21211	128462,60606	6,56026	0,00831
Error	16	313311,14756	19581,94672		
Total	18	570236,35967			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.

Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.

At the 0.05 level, the population means are significantly different.

Fit Statistics

	R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
	0,45056	0,05692	139,93551	2458,4164

Means Comparisons

Tukey Test

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
0,15 0,05	267,31882	77,85293	4,8559	0,00903	0,05	1	66,43353	468,2041
0,4 0,05	64,27216	80,7918	1,12505	0,71103	0,05	0	-144,19635	272,74068
0,4 0,15	-203,04665	77,85293	3,68838	0,0474	0,05	1	-403,93194	-2,16136

Sig equals 1 indicates that the difference of the means is significant at the 0,05 level.

Sig equals 0 indicates that the difference of the means is not significant at the 0,05 level.

Figura 89: Análise ANOVA - Rigidez para Grupo A20-xxx

ANOVAOneWay (20/03/2016 18:10:19)

Descriptive Statistics

	N Analysis	N Missing	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
AR300	8	0	2,86812	0,49532	0,17512
0,5% CNT	7	0	2,99586	0,10274	0,03883
1,0% CNT	7	0	2,53014	0,39198	0,14815
2,0% CNT	6	0	2,7855	0,14632	0,05974

One Way ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3	0,81654	0,27218	2,32498	0,10025
Error	24	2,80963	0,11707		
Total	27	3,62617			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.

Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.

At the 0.05 level, the population means are not significantly different.

Fit Statistics

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0,22518	0,12229	0,34215	2,79786

Means Comparisons

Tukey Test

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
0.5% CNT AR300	0,12773	0,17708	1,0201	0,88762	0,05	0	-0,36076	0,61622
1,0% CNT AR300	-0,33798	0,17708	2,69922	0,25107	0,05	0	-0,82647	0,15051
1,0% CNT 0,5% CNT	-0,46571	0,18289	3,60122	0,07778	0,05	0	-0,97022	0,03879
2,0% CNT AR300	-0,08262	0,18478	0,63236	0,96954	0,05	0	-0,59236	0,42711
2,0% CNT 0,5% CNT	-0,21036	0,19036	1,56281	0,68992	0,05	0	-0,73547	0,31475
2,0% CNT 1,0% CNT	0,25536	0,19036	1,89713	0,54664	0,05	0	-0,26975	0,78047

Sig equals 1 indicates that the difference of the means is significant at the 0,05 level.

Sig equals 0 indicates that the difference of the means is not significant at the 0,05 level.

Figura 90: Análise ANOVA - Deslocamento Máximo para os grupos com espessura de 0,05 mm

ANOVAOneWay (20/03/2016 18:11:30)

Descriptive Statistics

	N Analysis	N Missing	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
AR300	8	0	10,42	2,12214	0,75029
0,5% CNT	7	0	11,36857	0,20868	0,07887
1,0% CNT	7	0	9,57571	1,77961	0,67263
2,0% CNT	6	1	9,395	0,64878	0,26486

One Way ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3	16,54284	5,51428	2,50211	0,08349
Error	24	52,89241	2,20385		
Total	27	69,43524			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.

Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.

At the 0.05 level, the population means are not significantly different.

Fit Statistics

	R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
	0,23825	0,14517	1,48454	10,22643

Means Comparisons

Tukey Test

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
0,5% CNT AR300	0,94857	0,76832	1,74599	0,61167	0,05	0	-1,17089	3,06804
1,0% CNT AR300	-0,84429	0,76832	1,55404	0,6936	0,05	0	-2,96375	1,27518
1,0% CNT 0,5% CNT	-1,79286	0,79352	3,19524	0,13615	0,05	0	-3,98183	0,39612
2,0% CNT AR300	-1,025	0,80174	1,80802	0,58492	0,05	0	-3,23666	1,18666
2,0% CNT 0,5% CNT	-1,97357	0,82592	3,37932	0,10626	0,05	0	-4,25193	0,30479
2,0% CNT 1,0% CNT	-0,18071	0,82592	0,30943	0,9962	0,05	0	-2,45907	2,09764

Sig equals 1 indicates that the difference of the means is significant at the 0.05 level.

Sig equals 0 indicates that the difference of the means is not significant at the 0.05 level.

Figura 91: Análise ANOVA - Tensão Máxima para os grupos com espessura de 0,05 mm

ANOVAOneWay (08/02/2016 16:04:34)

Descriptive Statistics

	N Analysis	N Missing	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
AR300	7	0	2,78529	0,19918	0,07528
0,5% CNT	7	0	2,95529	0,36872	0,13936
1,0% CNT	7	0	3,25314	0,31318	0,11837
2,0% CNT	7	0	2,99114	0,24325	0,09194

One Way ANOVA

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3	0,78543	0,26181	3,14599	0,04364
Error	24	1,99728	0,08322		
Total	27	2,78271			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.

Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.

At the 0.05 level, the population means are significantly different.

Fit Statistics

	R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
	0,28225	0,09628	0,28848	2,99621

Means Comparisons

Tukey Test

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
0,5% CNT AR300	0,17	0,1542	1,55914	0,69147	0,05	0	-0,25537	0,59537
1,0% CNT AR300	0,46786	0,1542	4,2909	0,02735	0,05	1	0,04249	0,89322
1,0% CNT 0,5% CNT	0,29786	0,1542	2,73176	0,24185	0,05	0	-0,12751	0,72322
2,0% CNT AR300	0,20586	0,1542	1,888	0,55054	0,05	0	-0,21951	0,63122
2,0% CNT 0,5% CNT	0,03586	0,1542	0,32886	0,99545	0,05	0	-0,38951	0,46122
2,0% CNT 1,0% CNT	-0,262	0,1542	2,4029	0,34603	0,05	0	-0,68737	0,16337

Sig equals 1 indicates that the difference of the means is significant at the 0,05 level.

Sig equals 0 indicates that the difference of the means is not significant at the 0,05 level.

Figura 92: Análise ANOVA - Deslocamento Máximo para os grupos com espessura de 0,15 mm

ANOVAOneWay (08/02/2016 16:04:34)

ANOVAOneWay (08/02/2016 16:02:02)

**Descriptive Statistics**

	N Analysis	N Missing	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
AR300	7	0	11,05429	0,79198	0,29934
0,5% CNT	7	0	10,36143	1,29637	0,48998
1,0% CNT	7	0	12,03571	1,35693	0,51287
2,0% CNT	7	0	10,56429	1,05209	0,39765

**One Way ANOVA**

**Overall ANOVA**

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3	11,71247	3,90416	2,97122	0,05191
Error	24	31,5358	1,31399		
Total	27	43,24827			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.

Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.

At the 0.05 level, the population means are not significantly different.

**Means Comparisons**

**Tukey Test**

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
0,5% CNT AR300	-0,69286	0,61272	1,59918	0,67458	0,05	0	-2,38309	0,99737
1,0% CNT AR300	0,98143	0,61272	2,26523	0,39655	0,05	0	-0,7088	2,67166
1,0% CNT 0,5% CNT	1,67429	0,61272	3,8644	0,05285	0,05	0	-0,01595	3,36452
2,0% CNT AR300	-0,49	0,61272	1,13096	0,85385	0,05	0	-2,18023	1,20023
2,0% CNT 0,5% CNT	0,20286	0,61272	0,46821	0,98717	0,05	0	-1,48737	1,89309
2,0% CNT 1,0% CNT	-1,47143	0,61272	3,39619	0,10382	0,05	0	-3,16166	0,2188

Sig equals 1 indicates that the difference of the means is significant at the 0,05 level.

Sig equals 0 indicates that the difference of the means is not significant at the 0,05 level.

Figura 93: Análise ANOVA - Tensão Máxima para os grupos com espessura de 0,15 mm

ANOVAOneWay (08/02/2016 16:04:34)

ANOVAOneWay (20/03/2016 18:12:57)

**Descriptive Statistics**

	N Analysis	N Missing	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
AR300	8	0	3,801	0,50273	0,17774
0,5% CNT	6	0	2,85183	0,52189	0,21306
1,0% CNT	6	0	2,20967	0,59837	0,24428
2,0% CNT	6	0	-2,192	0,105	0,04286

**One Way ANOVA**

**Overall ANOVA**

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3	12,29205	4,09735	18,11399	3,77675E-6
Error	22	4,97636	0,2262		
Total	25	17,2684			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.

Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.

At the 0.05 level, the population means are significantly different.

**Fit Statistics**

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
0,71182	0,16726	0,4756	2,84342

**Means Comparisons**

**Tukey Test**

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
0,5% CNT AR300	-0,94917	0,25685	5,226	0,00643	0,05	1	-1,6624	-0,23593
1,0% CNT AR300	-1,59133	0,25685	8,7617	1,73351E-5	0,05	1	-2,30457	-0,8781
1,0% CNT 0,5% CNT	-0,64217	0,27459	3,30734	0,11967	0,05	0	-1,40465	0,12031
2,0% CNT AR300	-1,609	0,25685	8,85897	1,48024E-5	0,05	1	-2,32223	-0,89577
2,0% CNT 0,5% CNT	-0,65983	0,27459	3,39833	0,10592	0,05	0	-1,42231	0,10265
2,0% CNT 1,0% CNT	-0,01767	0,27459	0,09099	0,9999	0,05	0	-0,78015	0,74481

Sig equals 1 indicates that the difference of the means is significant at the 0,05 level.

Sig equals 0 indicates that the difference of the means is not significant at the 0,05 level.

Figura 94: Análise ANOVA - Deslocamento Máximo para os grupos com espessura de 0,40 mm

ANOVAOneWay (08/02/2016 16:04:34)

ANOVAOneWay (20/03/2016 18:14:05)

**Descriptive Statistics**

	N Analysis	N Missing	Mean	Standard Deviation	SE of Mean
AR300	8	0	12,48625	0,91686	0,32416
0,5% CNT	6	0	9,08	0,78256	0,31948
1,0% CNT	6	0	7,66	1,81518	0,74104
2,0% CNT	6	0	6,99333	0,60827	0,24832

**One Way ANOVA**

**Overall ANOVA**

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	3	129,56054	43,18685	34,83995	1,55851E-8
Error	22	27,27072	1,23958		
Total	25	156,83127			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.

Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.

At the 0.05 level, the population means are significantly different.

**Fit Statistics**

	R-Square	Coeff Var	Root MSE	Data Mean
	0,82611	0,11947	1,11336	9,31885

**Means Comparisons**

**Tukey Test**

	MeanDiff	SEM	q Value	Prob	Alpha	Sig	LCL	UCL
0,5% CNT AR300	-3,40625	0,60128	8,01145	5,94709E-5	0,05	1	-5,0759	-1,7366
1,0% CNT AR300	-4,82625	0,60128	11,35127	3,04261E-7	0,05	1	-6,4959	-3,1566
1,0% CNT 0,5% CNT	-1,42	0,6428	3,12411	0,15192	0,05	0	-3,20493	0,36493
2,0% CNT AR300	-5,49292	0,60128	12,91926	2,18181E-7	0,05	1	-7,16257	-3,82327
2,0% CNT 0,5% CNT	-2,08667	0,6428	4,59084	0,01802	0,05	1	-3,8716	-0,30174
2,0% CNT 1,0% CNT	-0,66667	0,6428	1,46672	0,72989	0,05	0	-2,4516	1,11826

Sig equals 1 indicates that the difference of the means is significant at the 0,05 level.

Sig equals 0 indicates that the difference of the means is not significant at the 0,05 level.

Figura 95: Análise ANOVA - Tensão Máxima para os grupos com espessura de 0,40 mm